

Universidad Católica de la Santísima Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



Distribución de As, B, Ca, Co, Na, P y S en Suelos Urbanos de Arica.

Ricardo Andrés Hernández Iturra.

INFORME DE PROYECTO DE TITULO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO
CIVIL INDUSTRIAL

Profesor Guía

Dr. Pedro Tume Z.

Profesor Informante

Dra. María Teresa Bull

Concepción, Septiembre 2015

Resumen ejecutivo

Arica es una ciudad ubicada en Chile en la región de Arica y Parinacota, la cual fue afectada entre los años 1984 y 1989 por una empresa llamada Promel Ltda. que trajo más de 20 mil toneladas de barros con un alto contenido en plomo y arsénico. Tiempo después SERVIU instaló casas en los alrededores de estos desechos tóxicos para más de 12.000 personas. Al cabo de unos años más de 3.000 personas comenzaron a presentar problemas serios de salud.

Es por ello que los objetivos a alcanzar en este proyecto son:

Estimar la distribución espacial del Arsénico (As), Boro (B), Calcio (Ca), Cobalto (Co), Sodio (Na), Fosforo (P) y Azufre (S), así como determinar las concentraciones de estos en los suelos de la región.

Para ello se realizaron histogramas, diagramas de caja y diagramas de frecuencia acumulada para cada uno de los metales en estudio, además luego de esto se realizó una tabla resumen de estadísticos descriptivos mostrando información cuantitativa. De estos resultados se arrojó que los elementos Na, Ca y P poseen las mayores concentraciones en promedio, mostrando una alta heterogeneidad, además de concentraciones muy altas. El análisis multivariado realizado mediante Correlaciones de Spearman, Análisis de componentes principales y análisis Clúster concluyó en que los metales As, B, Ca, Na y S se encuentran asociados debido a su alta heterogeneidad ya que la mayoría de estos metales poseen una mayor concentración en los suelos estudiados, por otro lado los metales Co y P se encuentran en un segundo grupo debido a la homogeneidad de las concentraciones.

Como segundo objetivo a realizar fue analizar la influencia de estos metales pesados en el uso del suelo y la geología. En este punto se realizo una clasificación sobre los puntos muestreados según el tipo de suelo en la cual se encontraban, de esta forma se pudo identificar 6 tipos de uso de suelo los cuales son: Peri-urbano, Comercial, Industrial, Residencial, Sitio F y Vía Férrea. Los resultados en este ítem mostraron que los mayores promedios fueron registrados para los elementos Na y P en el suelo Peri-urbano, otro uso de suelo que se registraron altos promedios fue en el Sitio F donde acentúan los elementos Na y Ca, además se destacan las correlaciones Na/Ca, S/Ca con 0.89 y 0.83 en el uso de suelo Peri-urbano.

La geología de la zona de Arica se clasifico mediante la información proporcionada del Sernagiomin. En estos usos geológicos se muestran una mayor correlación para S/Na y Co/Ca en muchos de los usos geológicos que se presentan en la ciudad, pudiendo indicar una procedencia de tipo natural para estos metales. Para la elaboración de mapas de distribución de contaminantes fueron realizados con el software ArcGIS 10.2.1 sobre la zona urbana de Arica con énfasis en la zona portuaria, el sector industrial y en las zonas de traslado a granel de metales pesados (vía férrea). Para los mapas de los metales As, P y S se muestra una mayor concentración en la zona portuaria de la ciudad evidenciando un origen antropogenico de estos metales ya que se realizan cargas y descargas a granel. Para el caso de los metales B, Ca y Co poseen bajas concentraciones en la ciudad de Arica solo para el caso del Co este presenta altas concentraciones al norte de la Ciudad cercano a la vía férrea.

El cuarto objetivo específico: evaluar la contaminación de suelos por metales pesados en suelos urbanos de Arica. Al comparar los índices de

contaminación que posee Arica frente a los valores presentados por la norma de los países bajos muestran que solo para el caso del Co existe una menor concentración en promedio, no así para el caso del metal pesado As. Para el resto de los metales no es posible realizar un análisis debido a que en la literatura no se encuentra información sobre el resto de los metales.

La norma de los países bajos para los valores de fondo muestra que para el As existe un 6,0% de las muestras contaminadas en cambio para Co solo un 0,75% , como se menciona anteriormente no se cuenta con información en la literatura para el resto de los metales pesados.

El porcentaje de muestras para suelos severamente contaminados y que necesitan de un tratamiento (polluted Values) es en un 10,0% para el P, un 9,0% para el As y un 6,0% para el Na. Esto indica que se está en presencia de suelos que han sido afectados por contaminaciones antropogénicas. Para los demás elementos estos presenta un porcentaje de contaminación menor al 5,5%.

Abstract

The city of Arica, located in the region of Arica & Parinacota in Chile, was affected by Promel Ltda., because they brought more than 20 tons of arsenic and lead contaminated mud between 1984 and 1989. After a while, SERVIU built homes for over 12000 people surrounded by those toxic wastes. Years later, around 3000 people start to show health problems.

For this reason, the objectives of this project are:

First, estimate the spacial distribution of Arsenic (As), Boron (B), Calcium (Ca), Cobalt (Co), Sodium (Na), Phosphorus (P) and Sulfur (S). For this purpose, histograms, box-plots and frequency charts were made for each of these elements, also after this, a statistics descriptive summary was made to show the quantitative data. The results showed a high concentration and heterogeneity of Sodium (Na), Calcium (Ca) & Phosphorus (P).

The multivariate analysis made trough Spearman Correlation, Cluster Analysis and Main Components Analysis shown a high concentration and heterogeneity of Arsenic (As), Boron (B), Calcium (Ca), Sodium (Na) & Sulfur (S) on the studied soils. On the other hand, Cobalt (Co) & Phosphorus (P) stands on a second group due the homogeneity of their concentrations.

Second, analyze the influence of these heavy metals on the soils and geology of Arica. A classification of the sampled points was made according to the soil in question: Peri-urban, Commercial, Industrial, Residential, Site F y Railroad. The highest overall results on the peri-urban soil were Sodium (Na) & Phosphorus (P), meanwhile on the site

F, the top overall were Sodium (Na) & Calcium (Ca), also the correlation Na/Ca, S/Ca con 0.89 & 0.83 on the use of peri-urban soil is remarkable. The geology of Arica was classified by the information retrieved from Sernageomin, were the correlation S/Na & Co/Ca are notice, which might indicate a natural origin for this metals.

Third, pollutant distribution maps of the urban zone of Arica have been elaborated trough ArcGIS 10.2.1 software, with emphasis on the port and industrial areas, as well of the railroader heavy metals transportation routes.

On the port area, Arsenic (As), Phosphorus (P) & Sulfur (S) showed the highest concentrations, revealing their anthropogenic origin. Between Boron (B), Calcium & Cobalt (Co), the last one presents the highest concentration on the north of the city, close to the railroads.

Fourth, evaluate the soil pollution by heavy metals on the urban soils of Arica. If we compare the contamination on Arica with the Netherlands Standard, Cobalt (Co) levels are lower than the standard, which is not the case of the Arsenic (As). Analysis of the other heavy metals cannot be done due to lack of literature information.

The Netherland Standard show a 6.0% of contaminated samples for Arsenic (As) and 0.75% for Cobalt (Co). (Analysis of the other heavy metals cannot be done due to lack of literature information).

The Polluted values are: Phosphorus (P) 10%, Arsenic (As) 9.0% & Sodium (Na) 6.0%. This indicates anthropogenic pollution on the soils. The rest of the elements show a contamination level below 5.5%.

Agradecimientos

A mi familia por su fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y aun en mis duros años de carrera profesional y en especial a mis padres que sin su ayuda hubiera sido imposible finalizar esta etapa.

A mi profesor de proyecto Don Pedro Tume por sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia y motivación las cuales fueron fundamentales culminar mi etapa de pre-grado.

A mis amigos por su apoyo incondicional en toda esta etapa de la carrera, por acompañarme en mis logros y fracasos, celebrar mis alegrías y compartir mi dolor.

Por último, agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme las fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

Índice

Resumen Ejecutivo	2
Abstract.....	5
Agradecimientos.....	7
Capítulo 1: Introducción.	17
1.1 Objetivo General.	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 Justificación del proyecto.	19
1.4 Alcance.....	20
1.5 Caso de estudio.	20
1.6 Geología de Arica	22
1.7 Climatología de Arica.	26
1.8 Demografía	29
1.9 Actividad Portuaria en Arica	30
1.10 Muestras en la ciudad de Arica.....	32
1.10.1 Determinación de la zona de muestreo	32
1.10.2 Recolección de muestras, almacenamiento y análisis	32
1.10.3 Metodología de muestreo.....	33
1.10.4 Procedimientos aplicados para el muestreo, manejo, embalaje y envío de muestras.....	35
1.10.5 Análisis de laboratorio de muestras.	35
1.10.6 Mapa de la zona de muestreo.	36
Capítulo 2: Marco Teórico	37
2.1 Estadística Descriptiva	37
2.2 Medidas de tendencia central	37
2.3 Medidas de dispersión	38
2.4 Descripción de la Geoestadística	41
2.5 Variograma	42
2.6 Tipos de variograma	44
2.7 Anisotropía.....	46
2.8 Kriging	46
2.9 Validación del kriging	47
2.10 Validación Cruzada	48
2.11 Elementos Traza.....	50
2.11.1 Arsénico (As)	50
2.11.2 Boro (B)	51

2.11.3 Calcio (Ca)	51
2.11.4 Cobalto (Co)	52
2.11.5 Sodio (Na)	52
2.11.6 Fosforo (P)	53
2.11.7 Azufre (S)	54
Capítulo 3: Metodología	55
3.1 Análisis exploratorio de los datos	55
3.2 Análisis descriptivo para la base de datos	56
3.3 Análisis Multivariante de la base de datos	56
3.4 Clasificación y tratamientos de los Usos de suelo	57
3.5 Tratamientos de la geología de Arica	58
3.6 Métodos de Evaluación de contaminación en suelos.....	58
3.7 Métodos Estadísticos.....	59
3.8 Valores de fondo	60
3.9 Analisis Geoestadístico con ArcGIS versión 10.2.1 (módulo Geostatistical Analyst)	61
3.10 Sistema de Coordenadas Utilizadas.....	62
Capítulo 4: Resultados y Discusiones	64
4.1 Análisis Calidad duplicados.....	64
4.2 Análisis exploratorio de datos de los elementos en estudio	64
4.2.1 Descripción de los Histogramas	65
4.2.2 Descripción de los box-plot	65
4.2.3 Descripción de los diagramas de Frecuencia acumulada	66
4.3 Interpretación de los estadísticos descriptivos en los elementos	69
4.4 Resultados del Análisis Multivariado.....	71
4.4.1 Correlación de Spearman	71
4.4.2 Análisis de Componentes Principales (ACP).....	73
4.4.3 Análisis Clúster	74
4.5 Análisis Usos de suelo	76
4.6 Análisis geología de Arica.....	83
4.7 Resultados Métodos de Contaminación en los Suelos.	87
4.8 Distribución espacial de los elementos	88
4.8.1 Distribución del As.....	90
4.8.2 Distribución del B.....	91
4.8.3 Distribución del Ca	92
4.8.4 Distribución del Co	93

4.8.5 Distribución del Na	94
4.8.6 Distribución del P	95
4.8.7 Distribución del S	96
Conclusiones	97
Bibliografía	98
Anexos	103
Anexo I	
Correlaciones para estudio de Valores Duplicados.	104
Anexo II	
Análisis multivariado según uso de suelo.	108
Anexo III	
Box-Plot de los usos de suelo en función de los elementos de estudio.....	121
Anexo IV	
Box Plot de las Geologías del suelo de Arica para cada Elemento en estudio	
.....	126
Anexo V	
Correlación de Spearman para la geología de la ciudad de Arica	131
Anexo VI	
Manejo del Software ArcGIS 10.2.1	135
Anexo VII	
Tutorial realizado en ArcGIS 10.2.1. Para selección de variogramas.	151

Índice de Tablas.

Tabla 1: Dirección e intensidad de vientos para la ciudad de Arica. Plan regulador de la Ciudad de Arica (2003-2004).pág. 23.....	27
Tabla 2: Cantidad de Población en Arica. INE 2012	29
Tabla 3: Transferencias en Toneladas realizadas por el puerto de Arica. Empresa Portuaria Arica (p.39).....	30
Tabla 4: Tipos de Predictores Kriging y sus Propiedades, Goovaerls P.1997.	47
Tabla 5: Resumen estadístico descriptivo de los elementos en estudio.	70
Tabla 6: Correlación de Spearman entre los elementos en estudio	71
Tabla 7: Ranking descendente de las correlaciones entre los elementos.	72
Tabla 8: Análisis de componentes principales explicado con cuatro componentes.....	73
Tabla 9: Estadísticos de Usos de Suelo.	79
Tabla 10: Estadísticos de Usos de Roca Geológicos.....	86
Tabla 11: Valores Umbrales en mgkg^{-1} para cálculo de proporciones de métodos.	87
Tabla 12: Porcentaje de muestras sobre límite superior de concentraciones de fondo y porcentajes de concentración de datos atípicos en suelos de Arica.	88
Tabla 13: Registro de errores para seleccionar el mejor modelo.....	89
Tabla 14: Correlación de Spearman para el Arsénico (As).	105
Tabla 15: Correlación de Spearman para el Boro (B).	105
Tabla 16: Correlación de Spearman para el Calcio (Ca).....	105
Tabla 17: Correlación de Spearman para el Cobalto (Co).	106
Tabla 18: Correlación de Spearman para el Sodio (Na).	106
Tabla 19: Correlación de Spearman para el Fosforo (P).....	106
Tabla 20: Correlación de Spearman para el Azufre (S).....	107
Tabla 21: Correlación de Spearman Uso de suelo Peri-Urbano.	109
Tabla 22: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Peri-Urbano.	110
Tabla 23: Correlación de Spearman Uso de suelo Comercial.	111

Tabla 24: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Comercial.	112
Tabla 25: Correlación de Spearman Uso de suelo Industrial.	113
Tabla 26: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Industrial.....	114
Tabla 27: Correlación de Spearman Uso de suelo Vía Férrea.....	115
Tabla 28: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Vía Férrea.	116
Tabla 29: Correlación de Spearman Uso de suelo Sitio F.	117
Tabla 30: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Sitio F.	118
Tabla 31: Correlación de Spearman Uso de suelo Residencial.	119
Tabla 32: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Residencial.....	120
Tabla 33: Correlación de Spearman de la Geología Qf (número de muestras 236).....	132
Tabla 34: Correlación de Spearman de la Geología Qm (número de muestras 7).	132
Tabla 35: Correlación de Spearman de la Geología Qa(número de muestras 66).	133
Tabla 36: Correlación de Spearman de la Geología PPI1r (número de muestras 12).	133
Tabla 37: Correlación de Spearman de la Geología J3i (número de muestras 24).	134
Tabla 38: Correlación de Spearman de la Geología Om1c (número de muestras 25).	134
Tabla 39: Correlación de Spearman de la Geología PPI1c (número de muestras 26).	134

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de la ciudad de Arica.....	21
Figura 2: Mapa geológico de Arica.....	25
Figura 3: Distribución de la dirección del viento en (%).	28
Figura 4: Tipos de Cargas realizas en el Puerto de Arica.).	31
Figura 5: Plantillas de distribución de áreas.....	33
Figura 6: Plantilla sobre el plano de la ciudad de Arica.....	34
Figura 7: Metodología de muestreo por puntos	35
Figura 8: Mapa de la zona de estudio de Arica con puntos muestreados	36
Figura 9: ejemplo de un Histograma con tendencia normal..	40
Figura 10: Ejemplo de un Box Plot	40
Figura 11: Ejemplo para Frecuencia acumulada	41
Figura 12: Ejemplo de Variograma	43
Figura 13: Comparación grafica de los tres modelos de transición	45
Figura 14: Coordenadas en UTM de la región de Arica y Parinacota. ...	63
Figura 15a: Descripción grafica de As, B y Ca (mgkg^{-1}) a través de diagramas EDA: Histogramas, box plot y diagramas de frecuencia acumulada.	67
Figura 15b: Descripción grafica de Co, Na, P y S (mgkg^{-1}) a través de diagramas EDA: Histogramas, box plot y diagramas de frecuencia acumulada.	68
Figura 16: Conductas de los elementos en estudio.	74
Figura 17: Análisis Clúster método Vecino más cercano.	75
Figura 18: mapa uso de suelo de la ciudad de Arica.	76
Figura 19: Distribución espacial de concentraciones de As.....	90
Figura 20: Distribución espacial de concentraciones de B.	91
Figura 21: Distribución espacial de concentraciones de Ca.	92
Figura 22: Distribución espacial de concentraciones de Co.	93
Figura 23: Distribución espacial de concentraciones de Na.	94
Figura 24: Distribución espacial de concentraciones de P.	95
Figura 25: Distribución espacial de concentraciones de S.	96
Figura 26: Análisis Cluster para uso de suelo Peri-Urbano.	109

Figura 27: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Peri-Urbano.....	110
Figura 28: Análisis Cluster para uso de suelo Comercial.....	111
Figura 29: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Comercial.	112
Figura 30: Análisis Cluster para uso de suelo Industrial	113
Figura 31: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Industrial.....	114
Figura 32: Análisis Cluster para uso de suelo Vía Ferrea.	115
Figura 33: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Vía Férrea.	116
Figura 34: Análisis Cluster para uso de suelo Sitio F.	119
Figura 35: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Sitio F.	118
Figura 36: Análisis Cluster para uso de suelo Residencial.	119
Figura 37: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Residencial.....	120
Figura 38: Box Plot del Arsénico para cada uso de suelo.	122
Figura 39: Box Plot del Boro para cada uso de suelo.....	123
Figura 40: Box Plot del Calcio para cada uso de suelo.....	123
Figura 41: Box Plot del Cobalto para cada uso de suelo.	124
Figura 42: Box Plot del Sodio para cada uso de suelo.	124
Figura 43: Box Plot del Fosforo para cada uso de suelo.....	125
Figura 44: Box Plot del Azufre para cada uso de suelo.	125
Figura 45: Box Plot Geología de Arica para Arsénico.....	127
Figura 46: Box Plot Geología de Arica para Boro.	127
Figura 47: Box Plot Geología de Arica para Calcio.	128
Figura 48: Box Plot Geología de Arica para Cobalto.	128
Figura 49: Box Plot Geología de Arica para Sodio.	129
Figura 50: Box Plot Geología de Arica para Fosforo.	129
Figura 51: Box Plot Geología de Arica para Azufre.....	130
Figura 52: Programa ArcMap 10.2.1	136
Figura 53: Ventana Principal del Programa ArcGIS 10.2.1	136
Figura 54: Menu desplegable de ArcGis para incertar coordenadas... ..	137
Figura 55: Menu de opcion para las coordenadas.....	137

Figura 56: libro de Excel con base de datos de las coordenadas y los elementos de estudio.	138
Figura 57: Ventana Principal de ArcGIS con los puntos incorporados.	138
Figura 58: menu desplegable de ArcGis para insertar mapas.	139
Figura 59: Ventana Principal de ArcGIS con los mapas y puntos incorporados.	139
Figura 60: Menu desplegable de "Geostatistical analysis".	140
Figura 61: Ejemplo de un "TrendAnalysis".	140
Figura 62: menú desplegable de "GeostatisticalAnalysis" para creación de Krigings.....	141
Figura 63: Paso 1 de 7 para creación de Krigings en los elementos ..	141
Figura 64: Paso 2 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	142
Figura 65: Paso 3 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	142
Figura 66: Paso 4 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	143
Figura 67: Paso 5 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	143
Figura 68: Paso 6 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	144
Figura 69: Paso 7 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	144
Figura 70: Reporte del Método utilizado.	145
Figura 71: Resultado del Kriging.	145
Figura 72: ajuste del Kriging al mapa.	146
Figura 73: selección del mapa para el ajuste del Kriging.	146
Figura 74: Kriging expandido en todo el Mapa de Arica.	147
Figura 75: Menú desplegable para los Layers.....	147
Figura 76: Menú de Data Frames.	148
Figura 77: Selección de Mapa para el ajuste del Kriging.....	148
Figura 78: Kriging ajustado al Mapa original.	149
Figura 79: Opciones del Kriging.	149
Figura 80: Trasparencia de los mapas del Kriging.....	150
Figura 81: Mapa final con Kriging y mapa de trasfondo.....	150
Figura 82: Menú desplegable de "Geostatistical Analysis" para creación de Krigings.....	147
Figura 83: Paso 1 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	152
Figura 84: Paso 2 de 7 para creación de Krigings en los elementos. .	153
Figura 85: Pasó 3 de 7 para creación de Krigings en los elementos ..	153
Figura 86: Pasó 4 de 7 para creación de Krigings en los elementos ..	154

Figura 87: Pasó 5 de 7 para creación de Krigings en los elementos .. 154

Figura 88: Pasó 6 de 7 para creación de Krigings en los elementos .. 155

Figura 89: Pasó 7 de 7 para creación de Krigings en los elementos .. 155

Capítulo 1: Introducción.

El suelo es uno de los componentes más importantes del medio, ya que constituye la base de las actividades humanas, siendo, además, el contacto entre la tierra, el aire y el agua lo que lo confiere capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso industrial.

Queriendo entender el concepto de suelo, Raquel Casas Flores (2012), lo define como "El resultado de la transformación, en el transcurso del tiempo, de un material geológico (roca Madre), por la Influencia de diversos procesos físicos, químicos y biológicos".

Utilizando esta ciencia en el estudio del suelo, es necesario contextualizarlo bajo la geoestadística. Esta es una rama de la estadística que se basa en fenómenos espaciales (Journel & Huijbregts, 1978). Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Myers, 1987). Esta herramienta permite una manera de describir la continuidad espacial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks & Srivastava, 1989). Petitgas (1996), la define como una aplicación de la teoría de probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales. Los mapas espaciales analizados proporcionan estimación de concentración en zonas no muestreadas, y por tanto, permiten delinear lugares y zonas potencialmente contaminadas, es decir, estimar concentraciones por encima del valor natural.

Los elementos traza están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg.kg^{-1}) en la corteza de la Tierra, suelos y plantas. Muchos de ellos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y seres humanos, aunque también pueden ser tóxicos si se superan ciertos umbrales. El origen de estos elementos pueden ser geogénicos o antropogénicos. Para el caso de los geogénicos, composición química pueda liberarse en la biosfera (ya sea en la superficie o cerca de la superficie) mediante distintos procesos ya sean mecánicos, químicos, o biológicos.

Con esto queremos decir que los elementos traza geogénicos son aquellos que pueden ingresar a la roca madre por medio de liberaciones como meteorización, emisiones volcánicas y lixiviados y/o alteraciones hidrotermales.

Por otro lado, las principales fuente de metales pesados antropogénicas se obtienen, además de actividades relacionadas con la minería, están otras actividades como las agrícolas (riegos, en piedras calizas, lodos residuales de depuradoras), actividades de generación de energía eléctrica (combustión de carbón) y actividades industriales (industria de productos químicos, fármacos, pigmentos y tintes, fábricas de hierro y acero), entre otras.

En el presente trabajo se realizaran estudios a muestras tomadas en el suelo urbano de Arica enfocándose en las concentraciones para los distintos elementos a analizar, pronosticando sus comportamientos mediante mapas de concentraciones en todo el sector de la ciudad de Arica, capital de la XV región de Arica y Parinacota, Chile.

1.1 Objetivo General.

- Estimar la distribución espacial de As, B, Ca, Co, Na, P y S en suelos de Arica.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar la concentración de los metales pesados mediante un análisis univariado y multivariado.
- Analizar la influencia del uso del suelo y la geología en la concentración de los metales pesados.
- Confeccionar mapas de la distribución de los metales pesados mediante kriging.
- Evaluar la contaminación de suelos por metales pesados en suelos urbanos de Arica.

1.3 Justificación del proyecto.

En Arica durante la década del 90 más de 12.000 personas comenzaron a presentar problemas de salud severos, los habitantes de la zona relacionaron estas enfermedades a los desechos tóxicos que allí se encontraban. Estos desechos fueron removidos en 1997 luego de muchas denuncias realizadas por parte de los afectados. Si bien el problema se creía finalizado, el conflicto reaparece en el 2009, luego de una denuncia realizada por el programa "Contacto" de Canal 13 sobre los efectos del plomo en la salud de la población. Luego de esto el Gobierno propuso un Plan Maestro -garantizado por ley- para erradicar a 7.000 personas y la realización de un registro de los alcances de la contaminación.

Es por ello que se debe conocer el suelo para lograr una mejor estimación sobre la calidad ambiental de estos suelos y si se está en presencia de contaminación por elementos traza. Por la cual, un estudio como este, se torna una gran utilidad ya que sirve como herramienta para dar asesoría, determinando así, la concentración de elementos químicos presentes en los suelos de la ciudad de Arica.

1.4 Alcance.

Este trabajo abarca una estimación sobre elementos traza de todo el sector de la ciudad de Arica de la XV región de Arica y Parinacota. Esta estimación será realizada mediante Geo estadística utilizada en el programa ArcGIS 10.2.1, donde se analizarán 440 muestras cada una con 6 submuestras. En estas muestras se determinaron elementos con resultados analíticos para la determinación de Arsénico(As), Boro (B), Calcio (Ca), Cobalto (Co), Sodio (Na), Fósforo (P) y Azufre (S), los que serán analizados en el programa IBM SPSS 19.0. Tras finalizar con esta etapa, se realizarán simulaciones con Kriging (método utilizado en geoestadística).

1.5 Caso de estudio.

Arica es una ciudad, comuna y puerto ubicada en el extremo norte de Chile, en la región de Arica y Parinacota. Las coordenadas de Arica son 18°28 30 sur, 70° 18 52 oeste.

A diferencia de otras ciudades de Chile, Arica se extiende sobre una extensa planicie costera que debido a la poca o nula presencia de la cordillera de la costa, permiten la extensión urbana de la ciudad. Arica Limita al norte con la República del Perú, al sur con la región de Tarapacá, al este con la República de Bolivia y al oeste con el Océano Pacífico.

Arica se ubica a una distancia aproximada de 2.000 km de la capital de Chile. La región de Arica y Parinacota posee una superficie de 16.898,6 Km^2 . La ciudad de Arica posee un área de 4.799,4 Km^2 (aproximadamente un 25% del total de la región) y una población estimada de 210.936 habitantes según INE 2012.



Figura 1: Mapa de la ciudad de Arica.

1.6 Geología de Arica

Dentro de La geología de Arica se presentan los típicos relieves de Chile: Cordillera de los Andes, Meseta o pampa y la Cordillera de la Costa.

La Cordillera de los Andes en esta región se caracteriza por ser un sector de topografía plana en altura, la cual se conoce como altiplano. En general, esta región se destaca como rasgo continuo altitudes que en promedio superan los 4.000 metros por sobre el nivel del mar. También se puede destacar la presencia de importantes conos volcánicos, como son: el Parinacota Guallatiri y el Tacora.

Entre la Cordillera de los Andes y los relieves costeros, se ubica la pampa interior. Este relieve está formado a partir de material sedimentario, por lo que se explica la regularidad que presenta su topografía, la cual se ve interrumpida por quebradas y cursos de agua intermitentes, dentro de estas quebradas encontramos Azapa, la quebrada de Vitor y la de Camarones entre otras.

La cordillera de la Costa nace en esta región más exactamente a partir del cerro Camaraca, esta se presenta como un acantilado amurallado que cae al mar desde una altura aproximada de 300 metros.

La geología de Arica ha sido clasificada por Sernageomin el año 2005 (Figura 2). En la que son definidos los siguientes tipos geológicos establecidos en la figura anterior. En este proyecto se identificaron 7 usos geológicos de los cuales están distribuidas las zonas de muestra. Estos son:

- **Qf Pleistoceno-Holoceno :**

Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

- **Qm Pleistoceno-Holoceno :**

Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.

- **Qa Pleistoceno-Holoceno :**

Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.

- **PPI1r Plioceno-Pleistoceno :**

Depósitos de remoción en masa: brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional. En la Cordillera Principal: flujos de detritos de las quebradas Lluta y Camarones (región I).

- **PPI1c Plioceno-Pleistoceno :**

Conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas, generalmente consolidados, de facies principalmente aluviales, subordinadamente lacustres y eólicas. En las regiones I a III forman abanicos aluviales inactivos mientras en Chile central (Estratos de Potrero Alto) son niveles aterrizados adosados al sustrato de la zona costera.

- **OM1c Oligoceno-Mioceno :**

Secuencias sedimentarias continentales parálicas o aluviales: conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y mantos de carbón. En la Cordillera Principal y Precordillera, regiones I y II: formaciones Altos de Pica (inferior) y San Pedro.

- **J3i Jurásico :**

Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: formaciones Camaraca y La Negra.

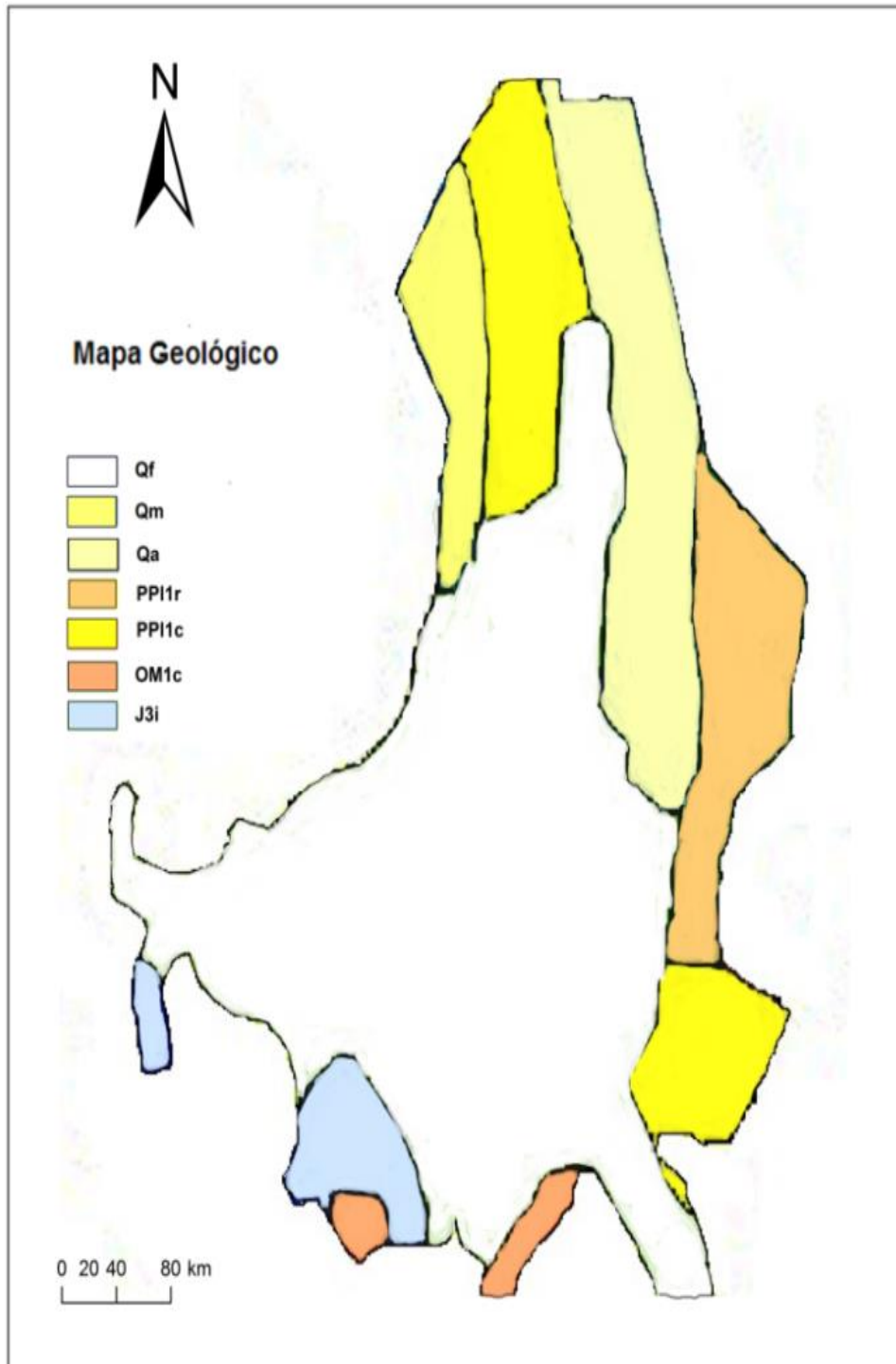


Figura 2: Mapa geológico de Arica. IAL AMBIENTAL LTDA, 2007

1.7 Climatología de Arica.

En la región de Arica y Parinacota se presentan cuatro tipos de climas los cuales se relacionan con las condiciones desérticas presentes en el lugar estos tipos de clima tienen un efecto directo con el estudio de los elementos ya que por acción del viento favorece a que muchos de estos elementos sean transportados a distintos lugares de la ciudad provocando así variaciones en sus concentraciones, en la costa de la región se presenta un clima desértico costero nuboso en donde hay presencia de abundantes nieblas matinales las cuales se deben principalmente por la corriente fría de Humboldt , luego en la zona de la pampa al interior de la región se encuentra un clima desértico el cual se caracteriza por su extrema aridez y pocas precipitaciones siendo además un clima más seco al clima desértico costero , en las zonas de mas altura en la región (sobre los 2000 mts.) se encuentra un clima desértico marginal aquí sus temperaturas son menores y existe una mayor cantidad de precipitaciones ,este tipo de clima se presenta en los meses de verano producto del invierno boliviano , por último se encuentra el clima de estepa de altura el cual predomina en el altiplano por sobre los 3.000 metros de altura. La principal característica es el aumento de las precipitaciones que alcanzan a 300 mm de agua caída en el año.

Como se menciona anteriormente la acción de los vientos en la región de Arica y Parinacota generan un efecto directo los elementos en estudio favoreciendo el transporte de sus partículas y así generar un aumento o disminución en las concentraciones de las muestras.

En la siguiente tabla se presentan las direcciones de viento junto a las velocidades en nudos para 2 años completos en la ciudad de Arica (2003 y 2004) en tres horarios distintos: a las 8:00 hrs, 14:00 hrs y 20:00 hrs.

Mes	Dirección 8:00 hrs.	Velocidad 8:00 hrs.	Dirección 14:00 hrs.	Velocidad 14:00 hrs.	Dirección 20:00 hrs.	Velocidad 20:00 hrs.
ene-03	N	3	SW	12	S	5
feb-03	-	4	SW	12	S	5
mar-03	E	4	SW	11	S	4
abr-03	E	5	SW	10	S	3
may-03	E	5	SW	9	SW	4
jun-03	E	6	SW	9	E	2
jul-03	E	5	SW	9	S	5
ago-03	E	5	SW	9	S	6
sep-03	S	4	SW	10	S	6
oct-03	S	4	SW	11	S	6
nov-03	S	4	SW	12	S	5
dic-03	N	5	SW	12	S	5
ene-04	N	6	SW	11	S	5
feb-04	E	4	SW	11	SW	4
mar-04	E	3	SW	10	S	4
abr-04	E	4	SW	10	W	2
may-04	E	6	SW	9	S	4
jun-04	E	5	SW	9	S	4
jul-04	E	6	SW	8	S	4
ago-04	W	4	SW	9	S	5
sep-04	E	5	SW	10	S	5
oct-04	SW	4	SW	11	S	5
nov-04	SW	4	SW	12	S	5
dic-04	S	3	SW	12	S	5

Tabla 1: Dirección e intensidad de vientos para la ciudad de Arica. Plan regulador de la Ciudad de Arica (2003-2004).pág. 23

En la figura 3 se muestra la rosa de los vientos para la ciudad de Arica donde se observa que el viento sigue en una dirección Sur Oeste, con velocidades entre los 7-9 nudos.

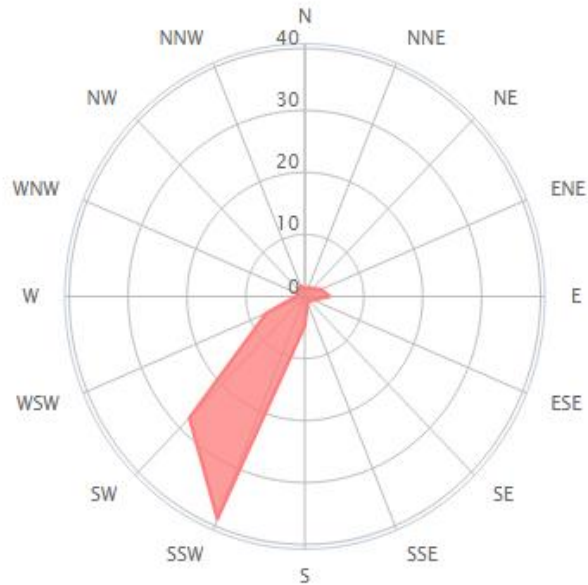


Figura 3: Distribución de la dirección del viento en (%).
<http://es.windfinder.com/windstatistics/arica>.

1.8 Demografía

Según los primeros datos aportados por el Censo 2012 del INE, la región está poblada por 230.000 habitantes. Su densidad alcanza a los 11,2 habitantes por km².

Esta región concentra la mayor población aimara y una importante cantidad de inmigrantes del Perú, Bolivia y de descendientes de asiáticos.

En la tabla 2 se puede apreciar el número total de la población regional la cual se conforma por urbana y rural.

	Población
Urbano	196,590
Rural	14,346
Total de Población en Arica	210,936

Tabla 2: Cantidad de Población en Arica. INE 2012

1.9 Actividad Portuaria en Arica

En el 2013 el puerto de Arica cumplió 2 hitos importantes, el primero fue el término del proyecto de rehabilitación del ferrocarril Arica a la Paz por motivo de los 100 años de esta histórica vía. En segundo lugar se generó un crecimiento para el puerto de Arica, donde se superó los 3 millones de toneladas en transferencia de carga, convirtiéndolo así en el 4° terminal del país.

A continuación en la tabla 3 se puede apreciar las distintas cantidades de carga (en toneladas) realizadas por los tipos de mercados en donde lideran Bolivia (correspondiente al 72% del total de las cargas) seguido por las cargas regionales (correspondiente al 13% del total de las cargas).

Mercado	Año 2012 (toneladas)	Año 2013 (toneladas)	Variación (%)
Carga Boliviana	1,931,349	2,355,427	22
Carga Regional	381,746	383,672	1
Otros	174,74	201,799	13
Carga Peruana	98,955	81,67	-18
Total	2,590,830	3,022,568	17

Tabla 3: Transferencias en Toneladas realizadas por el puerto de Arica. Empresa Portuaria Arica (p.39).

A su vez estos tipos de carga se realizan mediante 3 tipos las cuales son:

- Carga de Contenedores
- Carga por Granel
- Carga Fraccionada

En la figura 4 se muestra las variaciones entre el año 2012 y 2013 para cada tipo de carga donde el mayor aumento fue encabezado por la carga fraccionaria con un crecimiento del 75% , sin embargo la mayor cantidad de cargas que se transfieren son por contenedores (ocupando un 70% del total) , en segundo lugar se encuentran las cargas por granel (ocupando un 25%) y por último, las cargas fraccionarias (correspondiente a un 5% del total de las cargas). Finalmente en relación al año 2012 las cargas en general generaron un aumento del 17%.

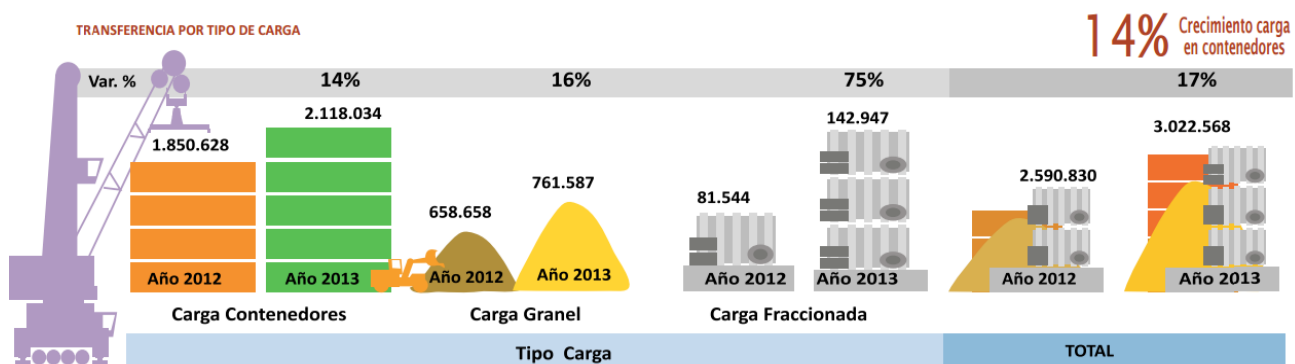


Figura 4: Tipos de Cargas realizadas en el Puerto de Arica. Empresa Portuaria Arica (p.39).

1.10 Muestras en la ciudad de Arica

1.10.1 Determinación de la zona de muestreo

Las muestras fueron obtenidas de la ciudad de Arica, capital de la XV región, las cuales fueron recolectadas de distintas zonas, entre ellas están: zonas agrícolas, industriales y periurbanas por petición de la CONAMA, debido a la expropiación presente de esta ciudad en la zona norte (lugar donde se presencia una zona periurbana).

1.10.2 Recolección de muestras, almacenamiento y análisis

La base de datos usada para este proyecto fueron extraídas del informe elaborado por el departamento de medio ambiente del centro Tecnológico Agriquem América S.A.(AGQ) , titulado "Análisis Químico de Suelos de la Ciudad de Arica", realizado entre agosto del 2008 y agosto del 2009.

1.10.3 Metodología de muestreo

Se ejecutó un muestreo de tipo sistemático o de rejilla (figuras 5 y 6), en el cual se seleccionaron puntos de forma aleatoria en un conjunto de cuadrantes predefinidos, con el fin de lograr una cobertura total en el área de estudio. (Cada uno de estos puntos fue georreferenciado).

En la siguiente figura se presenta la forma en la cual se realizó la división de la ciudad de Arica. Aquí se consideraron 40 áreas o cuadrantes. Los cuadrantes rojos (24 cuadrantes correspondientes al 60% del total) representan las áreas ubicadas al norte del lecho del Río San José y en amarillo (16 cuadrantes correspondiente al 40% del total) las áreas ubicadas al sur del mismo río.

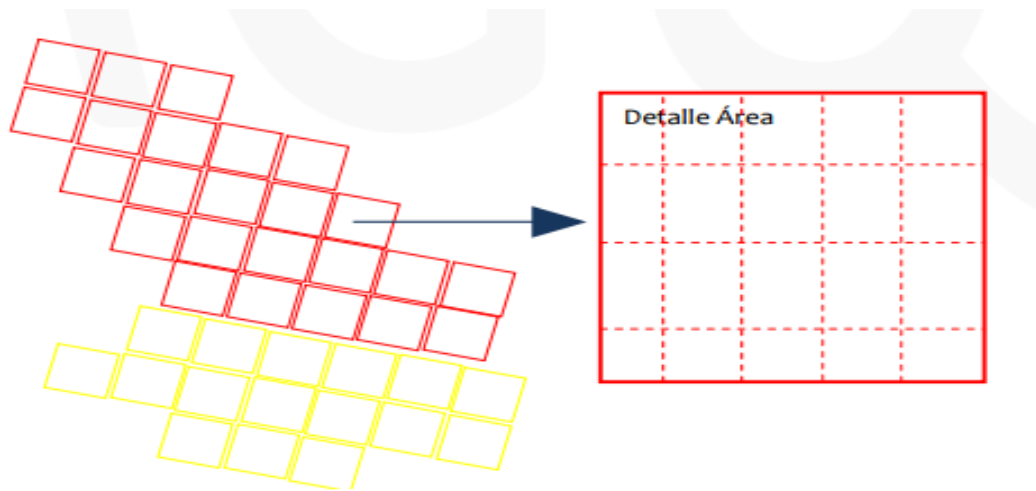


Figura 5: Plantillas de distribución de áreas. Agriquem América S.A. (p.16)

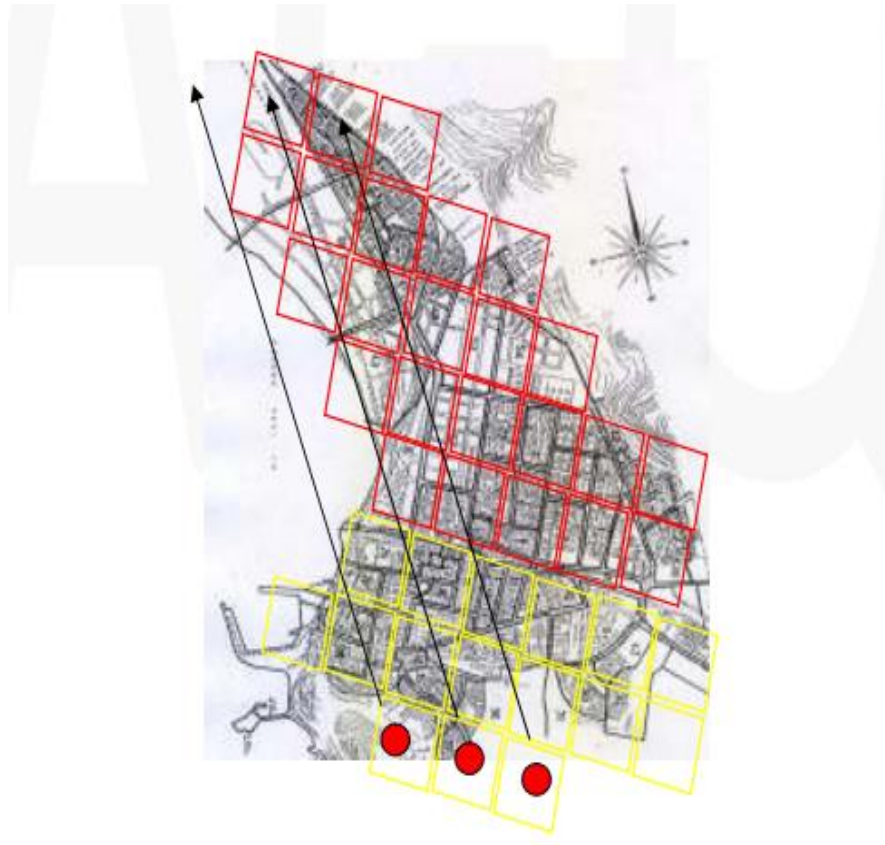


Figura 6: Plantilla sobre el plano de la ciudad de Arica. Agriquem América S.A. (p.17).

Por cada una de estas 40 cuadrillas se realizaron 11 muestras, con un total de 440 muestras, además para cada una de estas 440 muestras se realizó un total de 6 mediciones o submuestras, a las cuales se les considero un punto central y cinco equidistantes entre 0.8 y 1.0 metros en intervalos de 36° , las submuestras fueron las siguientes; 2 a nivel superficial, 2 a 15 cm y por último 2 a 30 cm. Con cada submuestra de esta se generó una muestra compuesta con un peso de 500 grs. como resultado, se tomó un total de 2640 submuestras en 440 puntos, lo que entregó un total de 440 muestras compuestas.

En la figura 7 se observa el modo en el cual se distribuyeron las submuestras para cada muestra.



Figura 7: Metodología de muestreo por puntos. Agriquem América S.A, 2009.

1.10.4 Procedimientos aplicados para el muestreo, manejo, embalaje y envío de muestras.

Las muestras fueron tomadas con adminículos plásticos previamente lavados con agua destilada para evitar contaminación cruzada. Posteriormente fueron almacenadas en bolsas plásticas con sello hermético y etiquetadas de acuerdo a un código de barra único y especial donde se especificaba a que cuadrante correspondía y su el número de la muestra al cual pertenece.

1.10.5 Análisis de laboratorio de muestras.

El método ocupado para la realización de los análisis en laboratorio fue el Inductively Coupled Plasma Optical Spectrometry (ICP-OES). La cual se basa en la vaporización, disociación, ionización y excitación de los diferentes elementos químicos de una muestra en el interior de un plasma.

1.10.6 Mapa de la zona de muestreo.

En la figura 8 se puede apreciar las muestras tomadas por el instituto Agriquem S.A. en la Ciudad de Arica.

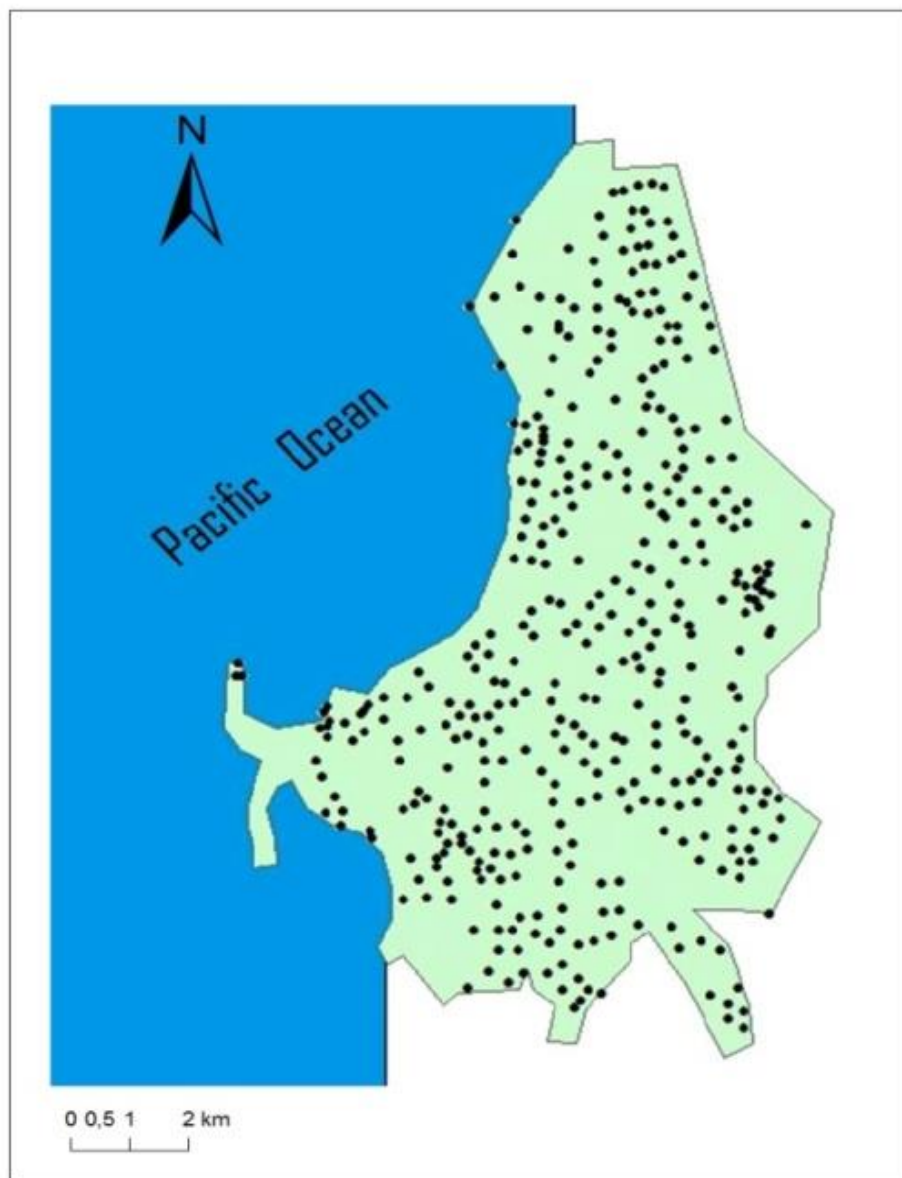


Figura 8: Mapa de la zona de estudio de Arica con puntos muestreados.

Capítulo 2: Marco Teórico

Para el desarrollo de este trabajo se necesitó recurrir a un estudio del tipo estadístico y geoestadístico, utilizando como herramientas los contenidos que se presentaran a continuación:

2.1 Estadística Descriptiva

Se refiere a todos aquellos registros u observaciones efectuadas que proporcionan una serie de datos que necesariamente deben ser ordenados y presentados de una manera clara. La estadística descriptiva desarrolla un conjunto de técnicas con la finalidad de presentar y reducir los diferentes datos observados.

Una vez que se obtienen los valores que forman las variables de nuestro estudio es decir, nuestros datos, se procederá a realizar el análisis descriptivo de los mismos.

Dentro de la estadística descriptiva también debemos determinar además, las medidas de tendencia central, y las medidas de dispersión (Ross ,2007).

2.2 Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central permiten resumir, en un único valor los resultados obtenidos para la totalidad de la muestra y en relación con cada una de las variables consideradas. Ese valor nos permite visualizar el comportamiento de la mayoría de los datos de la muestra. Dentro de las medidas de tendencia central se encuentran tres las cuales son (Elmer B. Mode, 1990):

- Media: Suma de los valores de la variable dividida por el número de valores observados.
- Moda: es el valor que se repite con más frecuencia.
- Mediana: representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

2.3 Medidas de dispersión

Estas medidas se encargan de medir la variabilidad existente entre los diversos valores que toma la variable con respecto a la mediana o media. Estas se pueden dividir en dispersiones absolutas y relativas (Antonio Vargas Sabadías, 1995).

- Dispersiones absolutas: suelen hacer referencia a un promedio y permiten estudiar la representatividad del mismo. Este tipo de medidas depende de las unidades, por lo que dificulta realizar cálculos a distintas dispersiones.
- Dispersiones relativas: a diferencia de las absolutas, estas si permiten realizar comparaciones entre distintas poblaciones ya que no dependen de las unidades.
- Varianza (S^2): es también una medida de dispersión definida como la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística.

- Desviación típica (S): es una medida de dispersión para variables cuantitativas o cantidades racionales y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable, expresada en las mismas unidades que la variable.
- Coeficiente de Variación (CV): establece una relación entre la desviación típica y su media, se expresa en porcentajes y permite comparar las dispersiones de dos distribuciones distintas, siempre y cuando sus medias sean positivas.
- Cuartiles: son tres valores que dividen a un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales. Q1, Q2 y Q3 corresponden a los valores 25, 50 y 75% de los datos, en donde Q2 (50%) coincide con la mediana.
- Percentiles: son los 99 valores que dividen la serie de datos en 100 partes iguales, los percentiles dan los valores correspondientes al 1, 5, ..., 99% de los datos, en donde P_{50} coincide con la mediana.

- Histograma: es una representación gráfica de la variación del conjunto de datos. Donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Se utilizan para variables continuas o para variables discretas, con un gran número de datos, y que se han agrupado en clases, En la figura 9 se puede apreciar un ejemplo de un histograma.

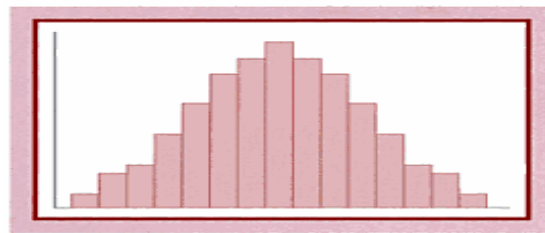


Figura 9: ejemplo de un Histograma con tendencia normal. Introducción a la estadística (p.109).

- Box Plot: Es un gráfico el cual representa los cuartiles con el cual se puede apreciar el conjunto de datos. Con este grafico se puede suministrar información sobre valores mínimos y máximos, además de los cuartiles Q_1 , Q_2 (mediana), Q_3 y sobre la existencia de valores atípicos. Este grafico se compone por un rectángulo (caja) y dos extremos (bigotes), en la figura 10 se puede ver un ejemplo de un box-plot.

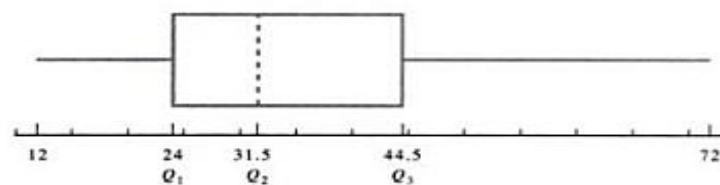


Figura 10: Ejemplo de un Box Plot. Matemática: Razonamientos y Aplicaciones. (p.759).

- Frecuencia acumulada: El análisis de la frecuencia acumulada se utiliza en conjuntos de datos observados de un cierto fenómeno a analizar. El conjunto puede usar unidades de tiempo, de espacio o puede tener otra unidad de medida, en la figura 11 se muestra un ejemplo de una frecuencia acumulada.

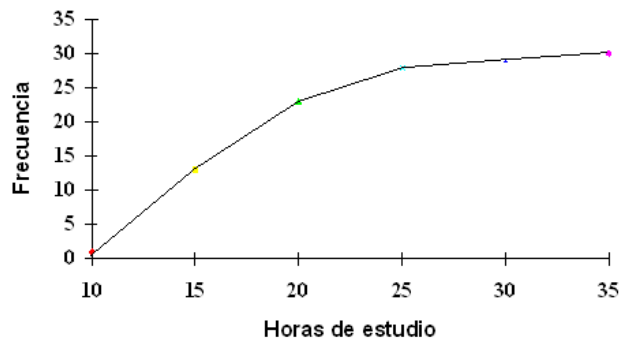


Figura 11: Ejemplo para Frecuencia acumulada para horas de Estudio.
<http://www.cyta.com.ar/>

2.4 Descripción de la Geoestadística

Esta es una rama de la estadística que se basa en fenómenos espaciales (Journel & Huijbregts, 1978). Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Myers, 1987). Esta herramienta permite una manera de describir la continuidad espacial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks & Srivastava, 1989). Petitgas (1996), la define como una aplicación de la teoría de probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales. La Geoestadística opera básicamente en dos etapas. La primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio.

En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica kriging. Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo.

2.5 Variograma

Wackemagel define el variograma como una herramienta básica para informar o analizar sobre las características espaciales del fenómeno que se está observando, y luego con esta información gráfica poder relacionarla con las características geológicas y geoquímicas de las variables, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias, para realizar estos estudios debe existir una relación entre los resultados procedentes del estudio con la realidad física. A partir de los datos proporcionados por el variograma teórico se realizará la estimación por krigeaje.

- Variograma experimental: Se denomina variograma experimental a aquel que es obtenido por estimación a partir de los datos de una muestra. El estimador más común se basa en el método de los momentos, que se presenta a continuación:

$$2\gamma = \frac{1}{|N(h)|} \sum N(h) * (Z(x_i) - Z(x_j))^2, \text{ con } h \in R^2$$

$$N(h) = \langle (x_i, x_j): x_i - x_j = h; i, j = 1, \dots, n \rangle$$

$|N(h)|$ = número de pares distintos.

En la literatura especializada este estimador es conocido como estimador clásico y es válido bajo condiciones de estacionalidad de segundo orden o procesos intrínsecos. Si bien el variograma pasa por origen, es decir, $2\gamma(0)=0$, existe una discontinuidad en el origen, la cual se conoce como una característica llamada efecto Nuggets o Pepita, el cual consiste en que los valores de las variables cambian bruscamente a escalas pequeñas lo cual se debe a errores de medición en las muestras tomadas. A continuación se presenta en la figura el efecto Pepita de manera gráfica en el variograma (Margaret Armstrong, 1950).

Si la micro variación es continua se puede asumir que el efecto Pepita se debe solo a un error de medición, en caso contrario se puede modelar el proceso a una escala muy pequeña que se conoce como "ruido blanco".

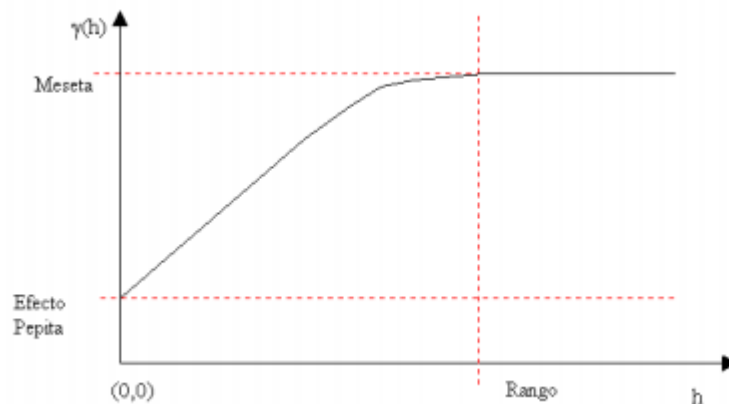


Figura 12: Ejemplo de Variograma (modelo esférico) mostrando sus características principales: efecto pepita, rango y meseta, Armstrong M. 1950.
http://revistacienciasforestales.uchile.cl/1999-2000_vol14-15/n1-2a1.pdf

2.6 Tipos de variograma

Dentro de los variogramas experimentales y según su comportamiento, se debe determinar algún modelo paramétrico que se ajuste adecuadamente a los datos muestrales. Los modelos más comunes pueden ser agrupados dentro de tres clases: modelos de transición, modelos sin meseta y por último modelos de efecto pepita puros (Pannatier, 1996).

Para este caso solo se trabajara con el primer tipo de modelo, modelos de transición entre los cuales analizaremos solo tres modelos:

Modelo exponencial, modelo Gaussiano y modelo esférico.

- **Modelo exponencial:** El modelo exponencial es un modelo demográfico y ecológico para modelar el crecimiento de las poblaciones y la difusión epidémica de un rasgo entre una población, basado en el crecimiento exponencial. Esta se expresa mediante el siguiente modelo:

$$Y(h) = C * (1 - e^{-\frac{3h}{a}}) \dots \dots \dots (1)$$

Donde "C" es la meseta o varianza y "a" es prácticamente el rango, esto es, la distancia en la que el valor del variograma alcanza el 95 % del valor de la meseta.

- Modelo Gaussiano: Este modelo con parámetro "a" y meseta "C" se define como:

$$y(h) = C_0 + C(1 - e^{(1 - \frac{h^2}{a^2})}) , \text{ con } 0 < h$$

Este modelo también alcanza su máximo asintóticamente. El alcance práctico puede ser obtenido como $a' = 3a$ reemplazando tenemos $a = (1/3) a'$.

- Modelo Esférico: El variograma esférico de alcance "a" y meseta "C" se define como:

$$y(h) = C_0 + \begin{cases} C(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} * \frac{h^3}{a^3}) , & h \leq a \\ C , & h > a \end{cases}$$

Este modelo tiene un comportamiento lineal en el origen y alcanza la meseta a una distancia igual al rango a.

En la siguiente imagen se presenta la comparación de manera gráfica de los tres modelos de transición:

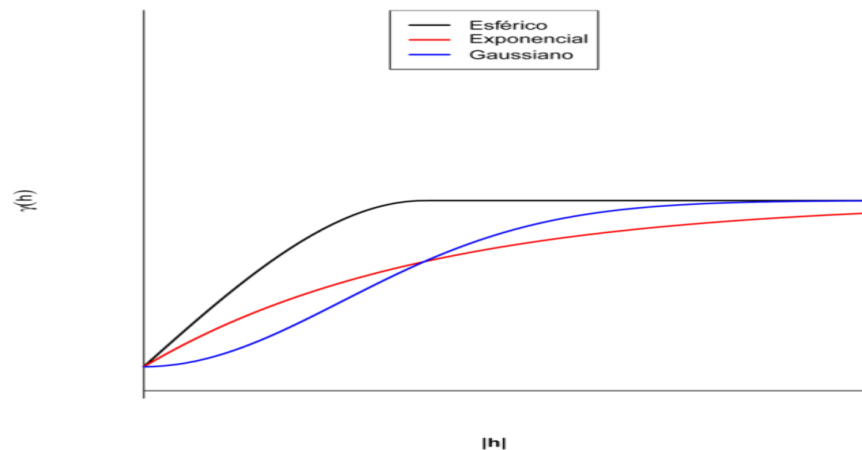


Figura 13: Comparación gráfica de los tres modelos de transición.
<http://ajperezluque.com/geosta-semivariogramas-teoricos-con-r/>

2.7 Anisotropía

Si al calcular Variogramas en diferentes direcciones, los valores del *rango* (a) presentan cambios, esto nos indica que se está dando una anisotropía geométrica, en cambio si la diferencia muestra cambios en el valor del Sill (valor que toma el variograma en distancias mayores al rango) en diferentes direcciones, entonces hay una anisotropía zonal. Algunos Variogramas son combinaciones de anisotropía geométrica y zonal. Se debe calcular varios Variogramas en diferentes direcciones, y hacer uso de un diagrama de rosa, para descubrir la existencia de anisotropía. La proporción de la anisotropía es la proporción entre el rango más pequeño y el rango más grande, utilizando una proporción de uno, indica un variograma isotrópico, es decir el mismo variograma en todas las direcciones (Gallardo, 2006).

2.8 Kriging

Éste procede del nombre del geólogo sudafricano D.G. Krige, cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década del cincuenta, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial. El kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción.

En la tabla 4 se encuentran los tipos de Kriging en base a su tipo de predictor (Pierre Goovaerls ,1997).

Tipo de Predictor	Nombre	Propiedades
Lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Ordinario • Universal 	<ul style="list-style-type: none"> • Son óptimos si hay normalidad multivariada • Independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados
No Lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador Probabilístico • Log Normal, Trans Gaussiano • Disyuntivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Son Predictores óptimos

Tabla 4: Tipos de Predictores Kriging y sus Propiedades, Goovaerls P.1997.

2.9 Validación del kriging

Existen diferentes métodos para evaluar la bondad de ajuste del modelo de semivariograma elegido, con respecto a los datos muestrales, y por ende de las predicciones hechas con kriging. El más empleado es el de validación cruzada, que consiste en excluir la observación de uno de los n puntos muestrales y con los $n-1$ valores restantes y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía kriging el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó. Se piensa que si el modelo de semivarianza elegido describe bien la estructura de auto correlación espacial, entonces la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña.

Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtiene un conjunto de n "errores de predicción". Lo usual es calcular medidas que involucren a estos errores de predicción para diferentes modelos de semivarianza y seleccionar aquel que optimice algún criterio como por ejemplo el del mínimo error cuadrático medio (MECM). Este procedimiento es similar a la conocida técnica de muestreo Jack nife (Efron, 1982) empleada en diversos contextos estadísticos para calcular varianzas de estimación, entre otros aspectos. Una forma descriptiva de hacer la validación cruzada es mediante un gráfico de dispersión de los valores observados contra los valores predichos. En la medida en que la nube de puntos se ajuste más a una línea recta que pase por el origen, mejor será el modelo de semivariograma utilizado para realizar el kriging.

2.10 Validación Cruzada

Es una técnica para comparar los valores verdaderos y estimados usando solo la información disponible en nuestros datos. Existe una forma de comprobar el efecto de todas las decisiones tomadas en los métodos de estimación de la variable en el espacio. El método consiste en eliminar el valor de una variable, calcular el semivariograma correspondiente y estimar el valor eliminado a partir de dicho semivariograma.

Estadística para la Validación Cruzada.

- Mean error: ME

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(x_i) - \hat{z}(x_i)$$

- Mean Squared error: MSE

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle z(x_i) - \hat{z}(x_i) \rangle^2$$

- Mean Squared deviation ratio: MSDR

$$MSDR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\langle z(x_i) - \hat{z}(x_i) \rangle^2}{\hat{\sigma}_k^2(x_i)}$$

En esta ecuación $z(x_i)$ es el i ésimo dato x_i , y $\hat{\sigma}_k^2(x_i)$ es la varianza del kriging.

2.11 Elementos Traza

La asociación Española de Ecología Terrestre (AEET) denominan elementos traza a aquellos elementos químicos externos que tienen una concentración baja en las plantas (inferior al 0,1 %), independientemente de que sean esenciales para su metabolismo o tengan efectos tóxicos. Los elementos traza, como el arsénico (As), cadmio (Cd) o talio (Tl), son poco abundantes en el agua y el suelo, en condiciones naturales. Sin embargo, las actividades industriales y mineras pueden originar una contaminación por estos elementos, que pasarían a las plantas y animales donde se pueden concentrar y causar efectos tóxicos.

Entre los elementos traza de este estudio se encuentran:

2.11.1 Arsénico (As)

El arsénico es considerado como una de las sustancias más letales para el ser humano, según el Decreto Supremo N° 594 (DS 594) es considerada un residuo peligroso, ya que una persona solo puede exponerse a una concentración de 0.01 mg/m³. En concentraciones superiores, esta sustancia puede generar:

- Híper pigmentación cutánea (cambiar a color café)
- Neuritis periférica (debilidad muscular, dolor y parestesias en las extremidades)
- Lesiones hepáticas
- Degeneración de la grasa del corazón

2.11.2 Boro (B)

El boro es ampliamente pero no uniformemente distribuido en el medio ambiente y los promedios de 15 mg/g en la corteza terrestre. Su contenido en rocas ígneas¹ intervalo de 5 a 30 mg/kg y aumenta con la acidez de las rocas. En rocas sedimentarias su contenido es mayor que en las rocas ígneas y está estrechamente asociada con la fracción de arcilla. Sus minerales comunes son: bórax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; colemanita, $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; y tourmalines entre otros, todos estos de una composición muy compleja.

Para los seres humanos, en bajas concentraciones el boro puede producir irritación en los ojos y nariz. Concentraciones superiores a 30 gr. de ácido bórico pueden afectar el estómago, los intestinos, el hígado, los riñones, el cerebro y eventualmente puede causar la muerte.

2.11.3 Calcio (Ca)

La mayoría de las reacciones importantes en la química de suelos involucran al calcio. Las rocas ígneas, el material original de todos los suelos, contienen alrededor de 5% de CaO. Si se analizan las aguas de drenaje de rocas o suelos, en forma de lavado en lisímetros, drenajes afluentes o agua de río, se encuentra que el Ca es uno de los constituyentes más abundantes. En rocas sedimentarias, grandes cantidades como calcio son regresadas como carbonatos y en menor cantidad como fosfato. Si se determinan la cantidad de cationes intercambiables en el suelo en la gran mayoría de los casos, el calcio es el ion más abundante en forma intercambiable.

¹ Rocas ígneas: son aquellas rocas que se forman por acción del enfriamiento del magma y su posterior solidificación.

Si bien el calcio no es un elemento peligroso para la vida humana en concentraciones altas este elemento puede provocar cálculos renales en las personas.

2.11.4 Cobalto (Co)

El cobalto es un elemento natural que se encuentra en las rocas, suelo, agua, plantas y en animales, este se utiliza para la producción de aleaciones en la manufactura de motores de aviones, imanes y articulaciones artificiales para la rodilla y cadera.

El cobalto radiactivo tiene usos comerciales y en medicina. Se utiliza en investigaciones clínicas y científicas, el cobalto tarda cerca de 5.27 años para que el número de átomos de un trozo de cobalto reduzca a la mitad por medio de la emisión de su radiación (vida media).

Para las personas el límite permisible ponderado del cobalto en una jornada de trabajo es de 0.018 mg/m³, superar esta concentración podría incurrir en asma y sarpullido en la piel del sujeto.

2.11.5 Sodio (Na)

Los suelos sódicos contienen alta cantidad de Sodio intercambiable y bajo nivel de sales solubles. El exceso de Sodio intercambiable tiene efecto adverso sobre el crecimiento de plantas y estructura del suelo. Su resultado se traduce en reducción en los rendimientos de cultivos.

En los suelos sódicos, las partículas de arcilla tienden a separarse. Este proceso de disociación técnicamente se denomina dispersión. Las fuerzas que mantienen unidas a las partículas de arcilla se interrumpen por los iones de Sodio.

Dentro de los riesgos para la salud el Hidróxido de Sodio puede provocar irritación en la piel, ojos y garganta además, La exposición severa a esta sustancia puede provocar quemaduras en la piel, y si es entra en contacto con los ojos puede ocasionar desde irritación hasta pérdida de visión.

2.11.6 Fosforo (P)

El Fósforo en su forma pura tiene un color blanco. El fósforo blanco es la forma más peligrosa de fósforo que es conocida. Cuando el fósforo blanco está presente en la naturaleza este puede ser un peligro serio para nuestra salud. El fósforo blanco es extremadamente venenoso y en muchos casos la exposición a él será fatal. En la mayoría de los casos la gente que muere por fósforo blanco ha sido por tragar accidentalmente veneno de rata. Antes de que la gente muera por exposición al fósforo blanco ellos a menudo experimentan náuseas, convulsiones en el estómago y desfallecimiento. El fósforo blanco puede causar quemaduras en la piel, dañar el hígado, corazón y riñones.

2.11.7 Azufre (S)

El contenido de azufre, en suelos de áreas de clima húmedo, se encuentra entre 0.02 y 2 %, pero en suelos pantanosos u orgánicos puede ser de 1 % y en charcos de 3,5 %, igual que el nitrógeno y el fosforo, el azufre se encuentra en formas orgánicas e inorgánicas. De acuerdo a las características físico-químicas y ambientales del suelo, la fracción de azufre inorgánica está presente como azufre elemental o en los diferentes niveles de oxidación (sulfuros, sulfatos, tiosulfatos entre otros).

Los compuestos del azufre presentan un olor desagradable y a menudo son altamente tóxicos. En general produce:

- Efectos neurológicos y cambios de comportamiento
- Fallos reproductores
- Daños en las funciones del hígado y los riñones
- Defectos en la audición
- Alteraciones del metabolismo hormonal
- Asfixia y embolia pulmonar

Capítulo 3: Metodología

El estudio realizado por Agriquem América S.a. en el año 2009 sobre la ciudad de Arica cuenta con una base de datos de 442 muestras la cual se compone por: 356 muestras únicas y 43 muestras que poseen duplicados para el aseguramiento de la calidad en las muestras cuyas concentraciones fueron promediadas generando así una nueva base de datos esta vez con 399 muestras.

Luego de obtener esta nueva base de datos (399 muestras) se debió realizar un trabajo estadístico univariado y multivariado, pero luego para el análisis geoestadístico esta base de datos se volvió a reducir a 396 debido a la presencia de 2 puntos que se encontraban muy alejado de la concentración de puntos en la zona de Arica(código de muestra C3M3.3 y R/referencia 7) y 1 punto que presenta concentraciones muy elevadas principalmente en el cobre (código de muestra C-17M17.8), los cuales si eran incluidos podrían generar errores de interpolación a la hora de generar los kriging simple sobre el resto de los puntos.

3.1 Análisis exploratorio de los datos

Para poder entender el comportamiento de los elementos(As, B, Ca, Co, Na, P, S) se debe conocer el comportamiento de forma gráfica con por esto se utiliza box-plot, frecuencias acumuladas e histogramas para ello utilizaremos el software llamado R Project.

3.2 Análisis descriptivo para la base de datos

Para el desarrollo de esta parte del trabajo se utilizó el software IBM SPSS el cual es un programa estadístico informático usado principalmente en ciencias sociales y para la investigación de mercado en las empresas. En este proyecto se debió realizar un análisis estadístico que incluye el cálculo de:

- Media
- Mediana
- Percentiles
- Coeficientes de variación
- Curtosis

3.3 Análisis Multivariante de la base de datos

Con la ayuda del software IBM SPSS 19.0 se pudo obtener el análisis de correlación entre los distintos elementos de estudio, así como también para los usos de suelo, correlaciones para geología de Arica y el análisis de la calidad del análisis químico. Otra información que obtuvimos por el software fue el análisis clúster bajo el método del vecino más cercano.

Por otra parte para la realización del Análisis de componentes principales (ACP) utilizamos el software SAS el cual destaca por su facilidad a la hora de realizar estas tareas.

3.4 Clasificación y tratamientos de los Usos de suelo

Al tener las ubicaciones geográficas de cada punto muestreado fue posible comprobar en qué tipo de suelo fue recogida esta muestra. Este proceso se llevó a cabo con la ayuda de Google Street.

Clasificación de los usos de suelo de la ciudad de Arica:

- **Comercial:** Referente a toda actividad que involucra comercio directo (ejemplo: Casas comerciales, negocios, ferias, etc.).
- **Industrial:** Toda actividad y localidad que involucre procesos industriales.
- **Peri-Urbano:** Espacio ubicado en el norte de Arica, este lugar es de interés para comparación de concentraciones de metales pesados con el resto de la ciudad de Arica. Zona en la cual hay poca o nula actividad humana.
- **Residencial:** Sitios en la cual presentan residencias urbanas así también como carreteras, caminos, parques y lugares periféricos.
- **Sitio F:** Sitio conflictivo el cual ha tenido problemas de contaminación y diversos problemas en la ciudad de Arica.
- **Vía férrea:** Localidades en la cual el traslado de minerales y diversas materias se encuentra directamente en el espacio en el cual transita los ferrocarriles.

Una vez concluida la clasificación de uso de suelo se aplicó estadística descriptiva para comprender y comparar las variaciones de cada elemento en estudio, además se realizó diagramas box-plot con el fin de comparar los distintos usos de suelo (ver Anexo III).

También se realizó un análisis a las correlaciones entre los diversos elementos del uso de suelo (ver anexo II), donde además se generó un mapa el cual refleja las áreas de cada uso de suelo.

3.5 Tratamientos de la geología de Arica

Con la ayuda del mapa geológico de Arica, fue posible analizar los puntos que fueron tomados como muestra y poder apreciar en qué tipo de roca están ubicados. Con esta información se pudo realizar estadísticos descriptivos de cada geología con las muestras, además de diagramas box-plot para una mejor y mayor interpretación entre las geologías presentes.

3.6 Métodos de Evaluación de contaminación en suelos

Con la finalidad de medir los índices de contaminación del suelo existen 2 métodos: el método estadístico y el método geoquímico (Matschullat, 2012), además existe un tercer método el cual corresponde a los valores de referencia regulatorios los que se basan en criterios toxicológicos (Desaules, 2012).

3.7 Métodos Estadísticos

Los métodos estadísticos intentan distinguir valores de una población contaminada a través de los datos mediante la identificación de altos valores atípicos en la base de los análisis univariados y multivariados, incluyendo gráfica (Desaules.2012).

No basta con la correcta aplicación de este método estadístico ya que, por sí solo no es posible distinguir confiablemente entre el ambiente natural y antropogénico de los elementos contenidos en el suelo. La razón es que los métodos estadísticos tratan cada oligoelemento como una identidad independiente, y no tienen en cuenta el contexto geoquímico específica de cada elemento (Myers & Thorbjornsen, 2004). En el proyecto presentado no se realizaron análisis de métodos geoquímicos debido a que no se dispone de información para realizarlo. A continuación se presentan tres métodos para determinar los valores de fondo (Tume et.al 2014):

1ª Método se debe trabajar con los valores en bruto (datos originales) donde luego se eliminan los valores atípicos (valores > upperwhisker), la concentración media y la desviación estándar (SD) se calcularon para establecer los niveles de referencia utilizando el $\text{media} + 2 \times \text{SD}$

2ª Método utilizando la mediana y la desviación absoluta de la mediana su expresión utilizada es: $\text{mediana} \pm 2 \times \text{MAD}$ (desviación absoluta de la mediana).

3ª Método conocido como UpperWhisker value cuya expresión es: Tercer Quartil +1.5 IRQ (rango intercuartilico), estos datos fueron calculados a partir de la base de datos.

3.8 Valores de fondo

Para el análisis de muestras contaminadas se aplicaron valores de referencia de los países bajos con el nombre de valores de fondo (Target Value) , estos son dos : el primero background values nos indican hasta qué punto podemos considerar un suelo como sustentable, el segundo polluted values es un valor de intervención el cual nos indica niveles serios de contaminación en el suelo, estos niveles fueron usados de referencia debido a que en Chile no se cuenta con una lista de niveles propios con la cual se pueda analizar las concentraciones de las muestras, cabe señalar que aquellas muestras que presenten niveles superiores a los índices anteriormente señalados se consideran valores anormalmente grandes sobre toda la base de datos (Rendon et.al, 2013).

3.9 Analisis Geoestadístico con ArcGIS versión 10.2.1 (módulo Geostatistical Analyst)

Descripción del Software:

ArcGIS 10.2.1 es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. En él se puede crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), El sistema proporciona una infraestructura para la elaboración de mapas y la información geográfica disponible en toda la organización, a través de una comunidad, y abiertamente en la Web.

ArcGIS es un software potente y amigable, el cual posee un módulo exclusivo sobre geoestadística, que contiene la opción de interpolación por Kriging y CoKriging, además de herramientas de análisis de modelos de elevación digital.

Con la ayuda de este software se pudo realizar un completo análisis de predicciones geoestadísticas mediante la técnica del Kriging para cada uno de los elementos en estudio, además se generaron mapas espaciales donde se muestran el kriging realizado para cada elemento mostrándose en la zona de Arica para su posterior interpretación. En el anexo VI se muestra en detalle la creación de los mapas mediante este software.

3.10 Sistema de Coordenadas Utilizadas

El sistema sexagesimal de las coordenadas geográficas (valores angulares expresados como grados, minutos y segundos) es bastante complejo de cara a la navegación, aviación comercial usos militares, etc. Por lo que se ha sustituido paulatinamente por sistemas de coordenadas U.T.M. (Universal Tranverse Mercator). Se trata de un sistema, muy preciso, de designación cartesiana de un punto, con la particularidad de que se expresa las distancias métricas respecto a una cuadrícula establecida.

A continuación se presenta el área de estudio (Arica) en coordenadas UTM:

En la figura 14 se muestra la ubicación con coordenadas geográficas de la región de Arica y Parinacota $18^{\circ}28'30''S$ y $70^{\circ}18'15''W$.

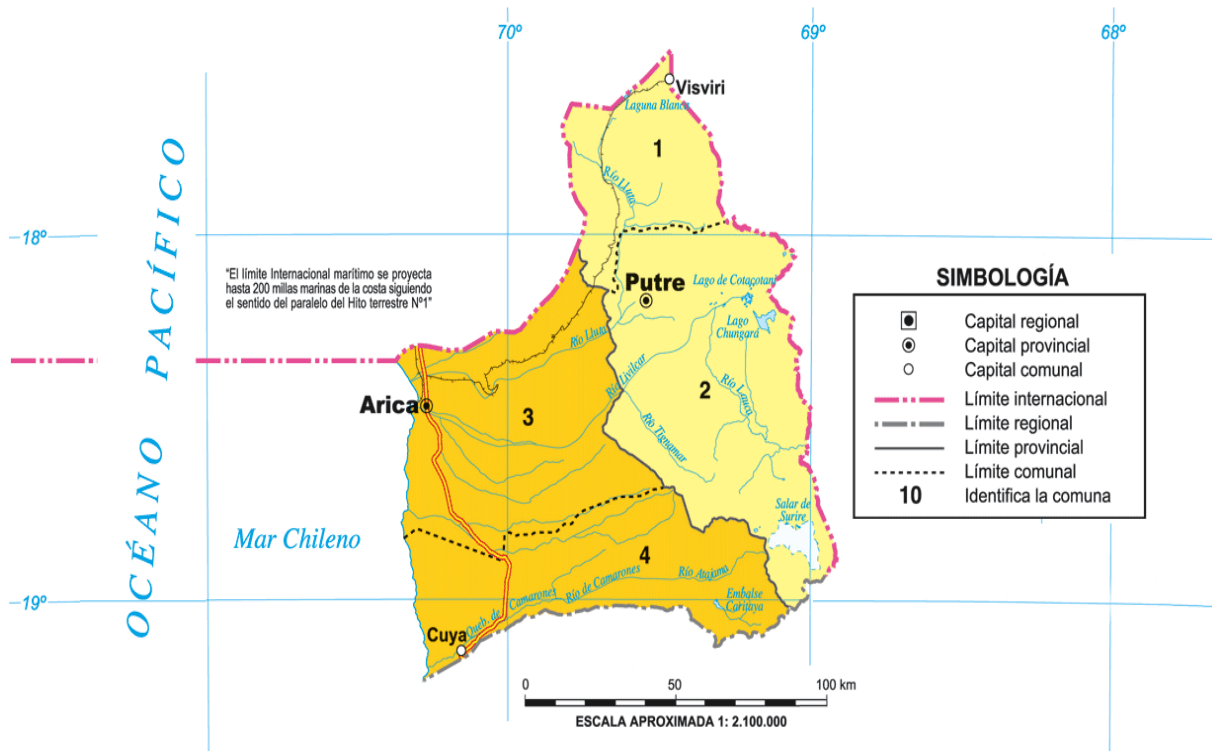


Figura 14: Coordenadas en UTM de la región de Arica y Parinacota.
<http://www.educarchile.cl>

Capítulo 4: Resultados y Discusiones

En este trabajo se tomaron 396 muestras las cuales se fueron recolectadas de distintos sitios de la ciudad de Arica .dentro de estas 396 muestras se estudiaron 7 tipos de elemento (As, B, Ca, Co, Na, P, S) donde se registraron sus concentraciones.

4.1 Análisis Calidad duplicados

En esta parte se realizó para todos los elementos coeficientes de correlación de Spearman para poder evaluar la calidad de los duplicados (ver anexo I). El rango de las correlaciones se encuentra entre 0.678 (P) y 0.930 (Co) .en orden descendente las correlaciones comienzan con Cobalto (0.930), Calcio (0.921), Azufre (0.919), Boro (0.905), Sodio (0.884), Arsénico (0.820) y por último el Fosforo con una correlación de 0.678

En el caso del Co y P estos elementos poseen un 2.02% y 4.18% respectivamente de valores bajo el límite de detección, estas concentraciones han sido modificadas como la mitad del límite de detección (Peltola & Amstrom, 2003) por lo cual estos valores fueron cambiados a el valor 0.0125 mgkg^{-1} .

4.2 Análisis exploratorio de datos de los elementos en estudio

Utilizando el software R proyect se obtuvo los histogramas, diagramas box plot y diagramas de frecuencia para cada uno de los elementos en estudio (figura 15a y 15b).

4.2.1 Descripción de los Histogramas

Los histogramas realizados para los elementos de estudio muestran en algunos casos una distribución sesgada o truncada, es decir con un pico descentrado dentro del recorrido de los datos, el mejor caso que representa esta descripción es el Calcio, donde sus colas descienden de un lado y aumentan en otro, en el caso de histogramas truncados el mejor ejemplo es del sodio presentando una forma escalonada en sus datos, por ultimo dentro de los histogramas con una distribución más representativas encontramos al cobalto con una distribución plana, es decir sin presencia de picos y con dos ligeras colas a los lados.

4.2.2 Descripción de los box-plot

Para los elementos en estudio se puede decir que en general todos los elementos presentan datos atípicos por lo que se aprecia en el box-plot mostrando cajas más achatadas donde solo el elemento Cobalto presenta una menor cantidad atípicos mostrando una distribución más equilibrada por lo que muestra una mediana ubicada más en el centro, más equidistante a sus extremos, volviéndola simétrica en comparación al resto de los elementos caso contrario es el azufre donde se muestra claramente que la mediana se encuentra más cercana al primer cuartil.

4.2.3 Descripción de los diagramas de Frecuencia acumulada

De los diagramas mostrados en el resumen exploratorio se muestran que ninguno de los elementos adopta una distribución normal exacta, es decir una recta en 45° , por lo que presentan distribuciones asimétricas (no hay presencia de una tendencia), esto se puede explicar por la naturaleza de los datos y en cómo fueron obtenidos estos.

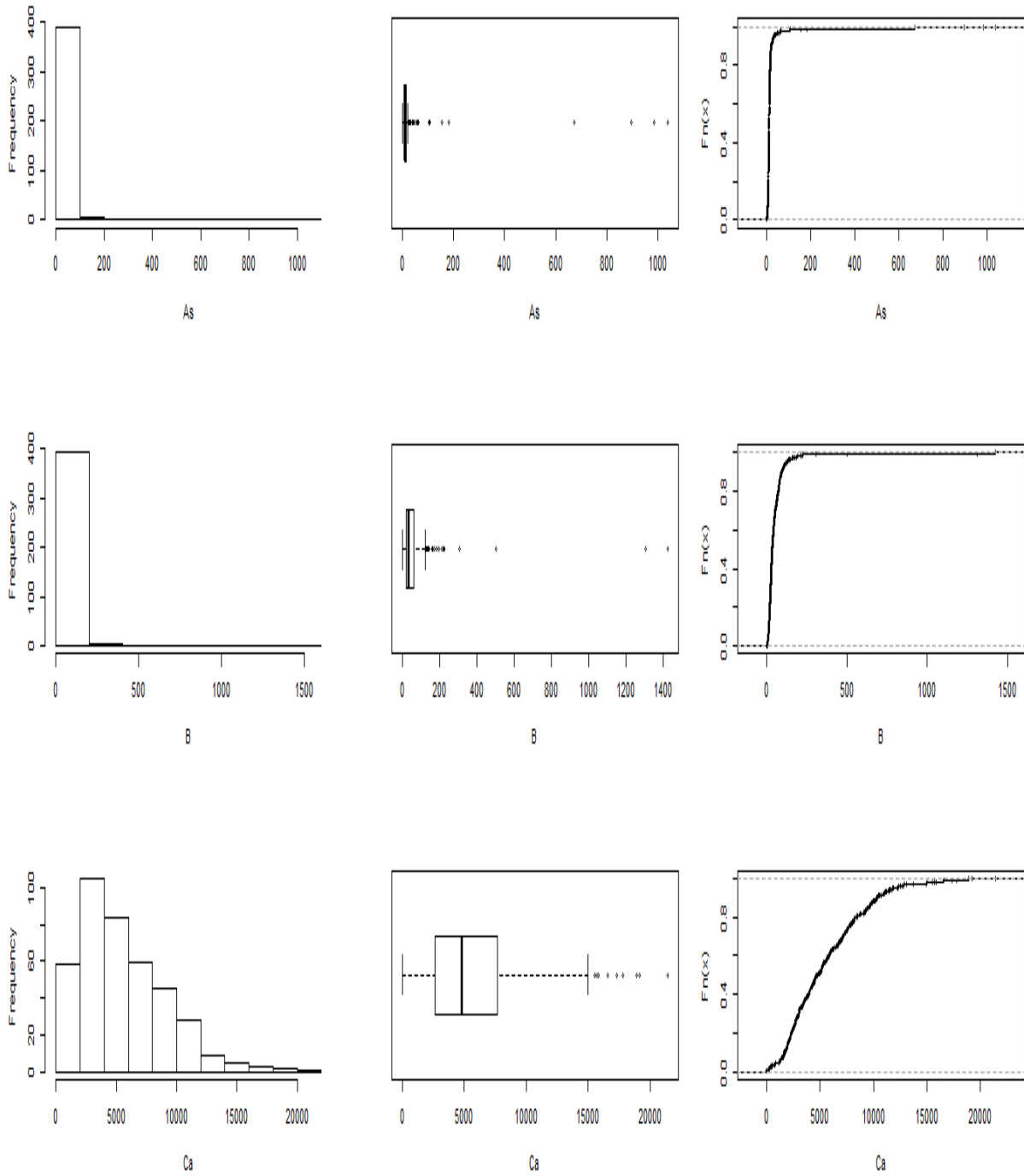


Figura 15a: Descripción grafica de As, B y Ca (mgkg^{-1}) a través de diagramas EDA: Histogramas, box plot y diagramas de frecuencia acumulada.

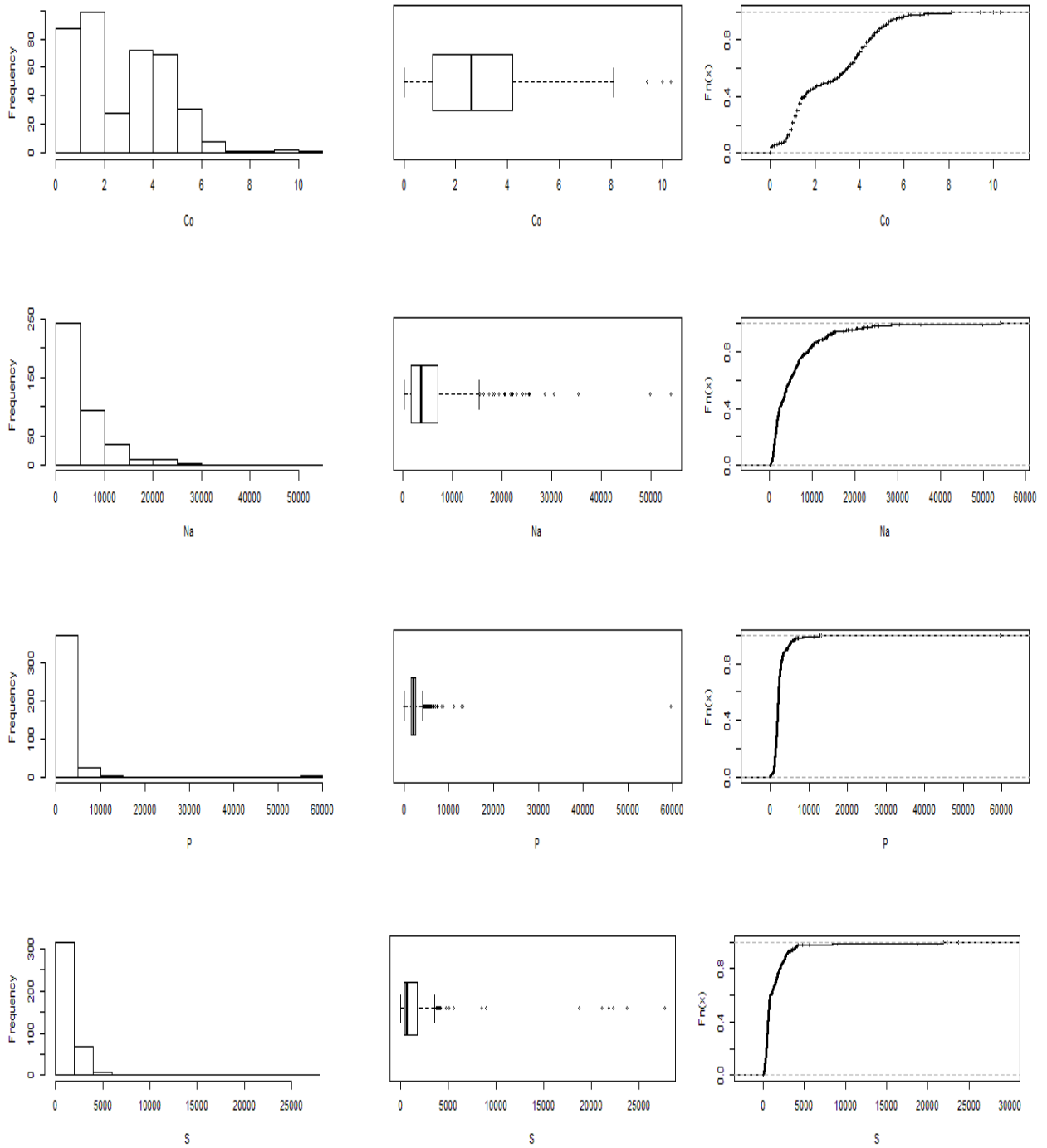


Figura 15b: Descripción grafica de Co, Na, P y S (mgkg^{-1}) a través de diagramas EDA: Histogramas, box plot y diagramas de frecuencia acumulada.

4.3 Interpretación de los estadísticos descriptivos en los elementos

En base a la Tabla 5 es posible apreciar que los valores más altos se encuentran en los elementos Sodio y Fosforo con concentraciones de $53,993 \text{ mgkg}^{-1}$ y $59,529 \text{ mgkg}^{-1}$. Sus desviaciones estándar son altas en comparación al resto, mientras que 6462 mgkg^{-1} y 3265 mgkg^{-1} lo que nos indica para el caso del sodio que el conjunto de valores se encuentra cerca de su media, no así para el caso del fosforo donde las diferencias entre su valor máximo y su desviación estándar son amplias.

Al ver el coeficiente de variación observamos que todos los elementos presentan un valor superior al 1.5 por lo que se puede decir que se está en presencia de datos heterogéneos.

Para el caso del coeficiente de asimetría y Curtosis podemos ver en general ninguno de los elementos sigue una distribución normal (la curva normal posee un valor 0 en coeficiente de asimetría y 3 como Curtosis).

Por último entre los rango de valores que posee cada elemento, todos poseen un amplio margen entre sus valores mínimos y máximos, exceptuando al Cobalto que posee un rango de valores que va de 0 a $10,3 \text{ mgkg}^{-1}$.

A continuación se presenta un resumen estadístico descriptivo para cada uno de estos elementos:

Elementos	Promedio	SD ^a	CV(%) ^b	Coef. De asimetría	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD ^c
							5	25	50	75	95		
As	22,8	90,7	397	9,8	97,8	0,1	4,3	8,3	11	14,5	32,1	1036	21,9
B	54,9	104	189	10,6	130	0,3	10.5	22	35	63,3	129	1423	38,2
Ca	5573	3692	66	1,1	1,4	8,9	1088	2687	4800	7716	12248	21414	2944
Co	2,8	1,9	69	0,63	0,18	0	0,1	1,1	2,6	4,2	5,66	10,3	1,64
Na	5708	6462	113	3.1	14.8	203	779	1579	3545	7103	18536	53993	4326
P	2528	3265	129	13.80	236	11.7	981	1592	2022	2640	5351	59529	1171
S	1507	2876	191	6.40	46.4	7.6	160	442	696	1741	3826	27684	1285

^a: desviación estándar

^b: coeficiente de variación

^c: desviación media absoluta

^d: coeficiente de variación robusto

Tabla 5: Resumen estadístico descriptivo de los elementos en estudio.

4.4 Resultados del Análisis Multivariado

En esta parte se evaluó los resultados del análisis de correlación de Spearman, el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el análisis Clúster.

4.4.1 Correlación de Spearman

Se realizó para ver las relaciones existentes entre los distintos elementos de estudio. En la tabla 5 se muestra el resultado de la correlación entre las variables de estudio las cuales fueron obtenidas mediante el software SAS.

Coefficientes de correlación Spearman, N = 399

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0.281**	1					
Ca	-0.002	0.040	1				
Co	0.262**	-0.035	0.497**	1			
Na	0.004	0.180**	0.249**	-0.133**	1		
P	-0.168**	0.400**	0.083	-0.119*	0.165**	1	
S	0.044	0.354**	0.153**	-0.231*	0.519**	0.362**	1

**coeficiente de correlación significativa al nivel de 0,01

* coeficiente de correlación significativa al nivel de 0,05

Tabla 6: Correlación de Spearman entre los elementos en estudio

Para una mejor apreciación de la correlación se realizó un ranking con los elementos en estudio donde se muestra de mayor a menor este fenómeno.

Posición	Combinación	Valor
1	Na/S	0,519
2	Ca/Co	0,497
3	B/P	0,400
4	S/P	0,362
5	S/B	0,354
6	As/B	0,281
7	As/Co	0,262
8	Ca/Na	0,249
9	S/Co	-0,232
10	Na/B	0,180
11	As/P	-0,168
12	Na/P	0,165
13	Ca/S	0,152
14	Na/Co	-0,134
15	Co/P	-0,119
16	Ca/P	0,083
17	S/As	0,044
18	Ca/B	0,040
19	Co/B	-0,035
20	Na/As	0,004
21	Ca/As	-0,002

Tabla 7: Ranking descendente de las correlaciones entre los elementos.

De la tabla 7 se desprende que los elementos que poseen una mayor correlación con otro elemento son Sodio-Azufre, Calcio-Cobalto y Boro-Fosforo con un valor de 0.52 ,0.497 y 0.4 respectivamente. Si bien estas correlaciones son las más altas del ranking, sus valores de correlación son positiva moderada ya que solo llegan hasta un 0,5 de correlación, por el contrario en correlaciones muy bajas están Cobalto-Boro, Sodio-Arsénico y Calcio-Arsénico, con valores de -0.035 ,0.004 y -0.018.

4.4.2 Análisis de Componentes Principales (ACP)

En la tabla 8 se muestra que la reducción de componentes principales (CP) llega a cuatro CP (CP4) explicando el 84% de la variación de los datos, la componente 1 explica el 27% de la varianza total y se asocia a los elementos Arsénico y Azufre, la segunda componente principal (CP2) explica el 49% de la varianza total y se asocia a los elementos Boro y Fosforo. La tercera componente (CP3) domina Cobalto y Calcio representa el 68% de la Varianza total. Por último CP4 correspondiente al 84% de la variabilidad total domina el Sodio. Esta información se ve respaldada por la figura 16 donde se observa el comportamiento de los elementos.

Metales Pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0,57	-0,27	0,34	0,02
B	0,38	0,56	-0,14	-0,14
Ca	-0,20	0,41	0,47	0,37
Co	-0,13	0,28	0,68	-0,09
Na	0,01	0,03	-0,22	0,89
P	0,30	0,58	-0,29	-0,07
S	0,62	-0,18	0,21	0,18
Porcentaje Varianza (%)	27	22	19	15
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	27	49	68	84

Tabla 8: Análisis de componentes principales explicado con cuatro componentes.

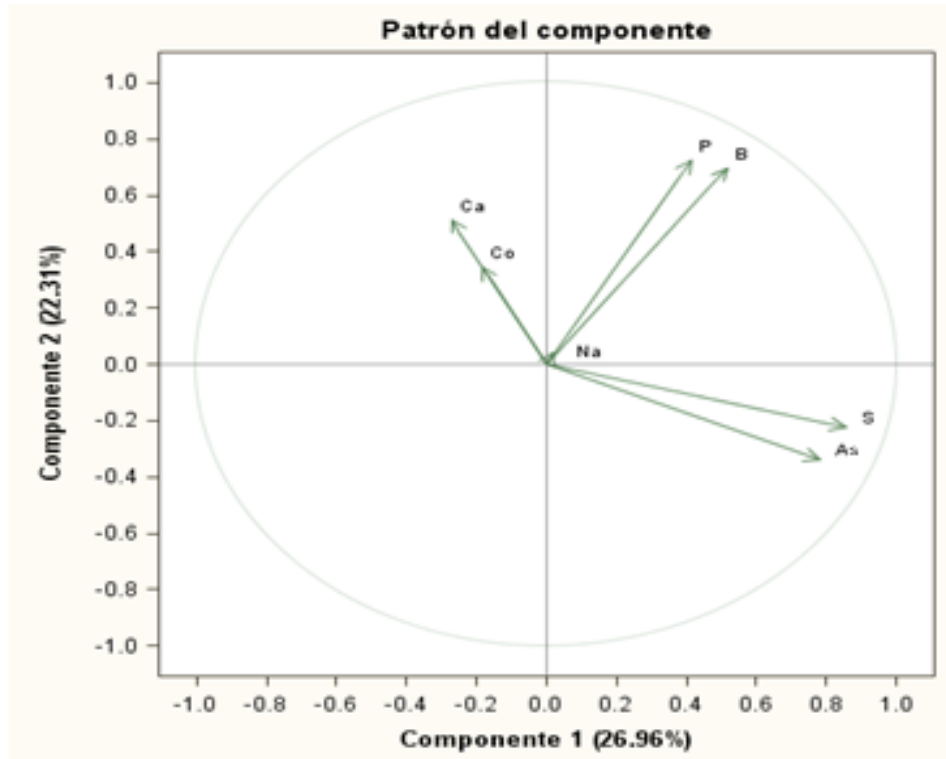


Figura 16: Conductas de los elementos en estudio.

4.4.3 Análisis Clúster

En la figura 17 se muestra el resultado del análisis Cluster realizado mediante el método del vecino más cercano, de esto podemos observar:

- Cluster 1: en este primer grupo se encuentra la mayoría de los elementos en estudio como As, Co, B, S, y Na, estos elementos cuentan con mayor homogeneidad, por lo cual se puede establecer una posible relación natural o litogénica.
- Cluster 2: este grupo contiene solo los dos elementos restantes Ca y P, presentando una mayor heterogeneidad, esto prueba que estos elementos puedan tener un origen antropogénico.

Dendrograma que utiliza una vinculación única

Combinación de conglomerados de distancia re-escalados

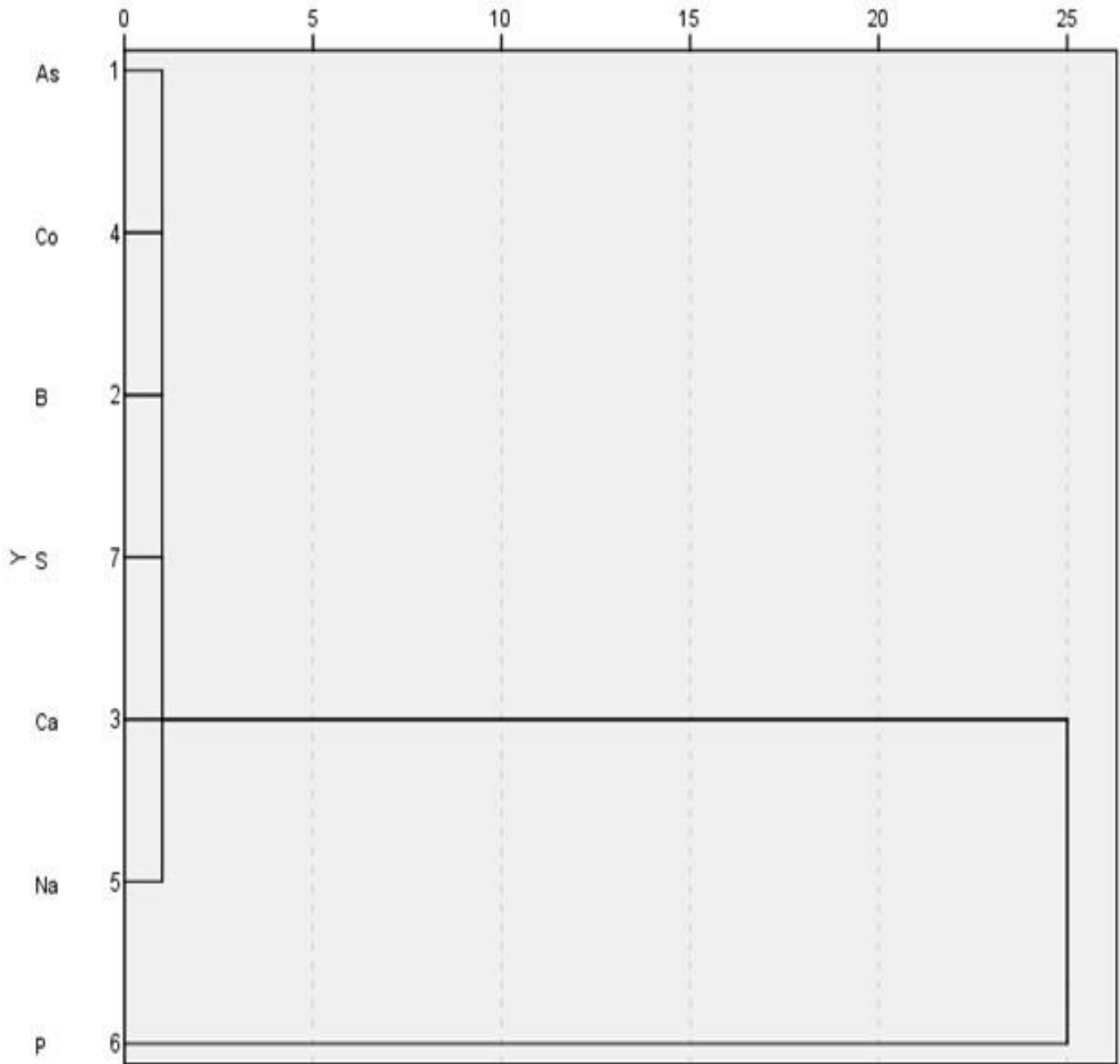


Figura 17: Análisis Clúster método Vecino más cercano.

4.5 Análisis Usos de suelo

Lo primero que se debió realizar fue identificar los distintos usos de suelo que se encuentran en la ciudad de Arica generando el siguiente mapa (figura 19).

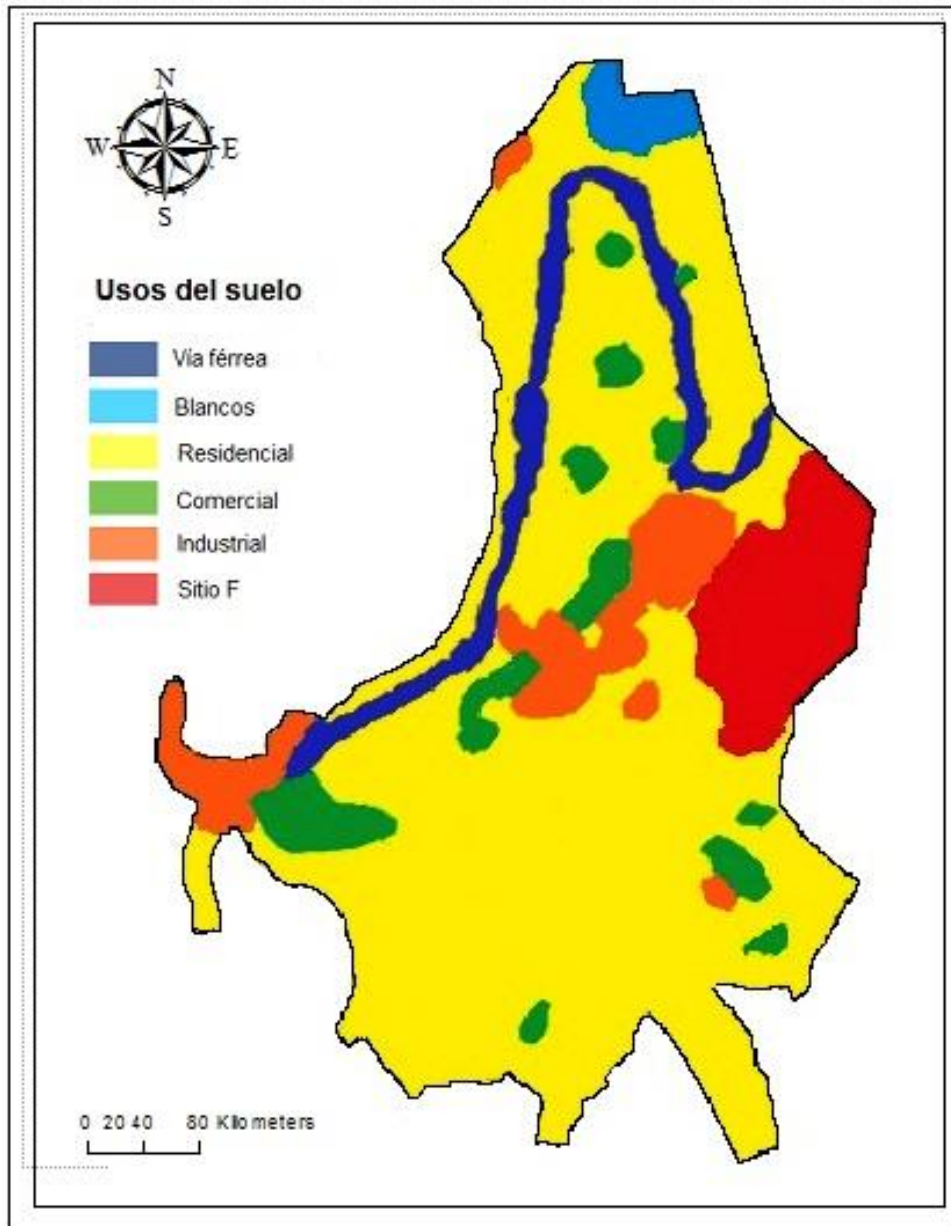


Figura 18: mapa uso de suelo de la ciudad de Arica.

Con la ayuda de los análisis de correlaciones (anexo II) entre los distintos elementos para cada uso de suelo podemos concluir lo siguiente:

- Sitio Peri-Urbano: las correlaciones entre Calcio, Sodio y Azufre presentan los valores más altos de la tabla, presentando una correlación alta positiva (sobre el 80%). Esto se debe a que los tres elementos poseen un origen común en la Roca Madre.
- Sitio Comercial: en esta parte los elementos en general no presentan mucha afinidad entre si ya que los valores de correlación no superan el 50% lo cual indicaría solamente una correlación moderada, por lo cual no se puede establecer ninguna característica común entre dos o más de estos elementos.
- Sitio Industrial: en este suelo destacan una gran afinidad los elementos Arsénico, Cobalto, Azufre, mostrando correlaciones positivas altas sobre el 70% (As/S con un 0.77 y Co/Ca con un 0.751).
- Vía Férrea: en este sector los elementos que destacan son Azufre, Boro y Calcio con una correlación moderada sobre el 60% (S/B con 0.682 y S/Ca con 0.630) esto puede hacer referencia a un origen común debido a los trenes de carga a granel que transportan estos elementos con frecuencia desde Bolivia.
- Sitio F: aquí resaltan los elementos Cobalto/Calcio y Azufre/Fosforo con correlaciones positivas moderadas de 0.576 y 0.514 respectivamente. En este sector se encuentran mayores concentraciones de estos elementos convirtiéndolo en un sitio conflictivo para la sociedad.

- Sitio Residencial: esta es la zona poblada de la ciudad aquí los elementos en general son de bajas concentraciones en comparación al sitio F o el sitio Periurbano, los elementos que poseen una mayor afinidad en relación a los demás son Cobalto/Calcio y Azufre/Sodio con una correlación positiva moderada de 0.544 y 0.632 respectivamente.

id Suelos	SPM							
	Parámetro	As (mg kg-1)	B (mg kg-1)	Ca (mg kg-1)	Co (mg kg-1)	Na (mg kg-1)	P (mg kg-1)	S (mg kg-1)
Peri-Urbano (n:6)	Rango	7.6-11.4	45.1-63.6	1870-2720	1.3-2.4	4837-22871	3950-7640	945-5572
	promedio	8.7	55,8	2234	1.8	12057	5203	3262
	SD	1.4	7,9	366	0,44	6117	1327	1513
	mediana	8.1	58,1	2167	1.9	11020	5014	3264
Comercial (n:23)	Rango	0.10-19.2	14.2-220	1195-15866	0.4-6.0	554 -35387	1126-12843	146-3970
	promedio	11.3	51,7	5284	2,0	5928	3299	1265
	SD	4.3	45,5	3941	1,6	7847	2561	1191
	mediana	11.9	33,5	3847	1,2	3410	2387	653
Industrial (n:31)	Rango	4.3-1036	12.1-308	8.9-12827	1.2-5.3	349-18450	109-4932	112-27684
	promedio	14.5	71.4	5145	3.5	3977	1634	5540
	SD	307	72.9	4059	1.2	4489	1036	8907
	mediana	16.8	38.0	5415	3.8	2221	1500	960
Residencial (n:285)	Rango	0.60-64	0.3-502	180-21414	0-9.4	330 -53993	11.7-13151	8.2-5086
	promedio	11.6	47.2	5565	2.5	5780	2440	1121
	SD	7.3	44.1	3705	1.8	6554	1516	954
	mediana	10.6	34.6	4488	1.7	3620	2071	689
Sitio F (n:23)	Rango	11.9-183	17.6-106	516-19191	0.4-10.0	1410-22868	550-2783	188-2719
	promedio	30.3	40.5	8221	3.8	10485	1601	1139
	SD	35.4	19.9	3621	1.8	6764	580	800
	mediana	19.0	35.6	8068	3.9	7851	1624	790
Vía férrea (n:31)	Rango	0.7-105	3.3-1423	183-10373	0.01-10.3	202-7545	209-59529	7.6-8505
	promedio	15.4	116	4916	4.4	2310	3729	1200
	SD	17.8	318	2285	2.1	1779	9899	1805
	mediana	10.9	29.2	4905	4.3	1666	2002	503

Tabla 9: Estadísticos de Usos de Suelo.

En base a la tabla 9 se concluye:

- Los valores más altos del Arsénico se encuentran en el sitio Industrial con un promedio de 14.5 mg kg^{-1} , con una concentración máxima de 1036 mg kg^{-1} (código C-33M33.4) y una mínima de 4.3 mg kg^{-1} (código C-35M35.5) esto se puede tener relación con los desechos que arrojan las industrias con sus procesos industriales químicos.
- Los valores más altos del Boro son registrados en el sector Industrial con un promedio de 71.4 mg kg^{-1} , con una concentración máxima de 308 mg kg^{-1} (código C-33M33.7) y un mínimo de 12.1 mg kg^{-1} (código C-13M13.4) esto puede tener relación al igual que el Arsénico a su utilización para procesos industriales químicos.
- Para el caso del Calcio su promedio más alto se registra en el sector de las Sitio F con un promedio de 8221 mg kg^{-1} , con una concentración máxima de 19191 mg kg^{-1} (código C-15M15.1) y un mínimo de 516 mg kg^{-1} (código C-1M1.4) esto puede tener relación a que este elemento ya es abundante en la naturaleza y por la acción del hombre este aumento sus concentraciones.
- El Cobalto registra su promedio más alto en el sector Vía Férrea con 4.4 mg kg^{-1} , con una concentración máxima de 10.3 mg kg^{-1} (código C-3M3-5) y un mínimo 0.01 mg kg^{-1} (código C-30M30.2), esto puede tener relación a que se transporta en los trenes este elemento entre otros más, lo que causa un aumento en sus concentraciones en todo este uso de suelo.

- El Sodio posee su promedio más alto en el sector peri-urbano registrando 12057 mg kg^{-1} y un valor máximo de 22871 mg kg^{-1} (código Referencia 3) y un valor mínimo de 4837 mg kg^{-1} (código Referencia 1), esto se debe a que es un elemento muy abundante en la naturaleza y en este sector existe poca o nula participación del hombre por lo cual bajo estas condiciones se puede relacionar sus altas concentraciones.
- Para el caso del Fosforo su promedio más alto se encuentra en el sector Peri-Urbano con un promedio de 5203 mg kg^{-1} (promedio más alto de todos los elementos presentes en el sector industrial) y con un valor máximo de 7640 mg kg^{-1} (Código Referencia 6) y un valor mínimo de 3950 (código Referencia 2) de como ya se ha hecho referencia este elemento es abundante en la naturaleza lo cual podría explicar sus altas concentraciones.
- El Azufre al igual que el sodio registran sus valores más altos en el sector peri-urbano registrando una media de 3262 mg kg^{-1} y un máximo de 5572 mg kg^{-1} (código Referencia 3) y un mínimo de 945 mg kg^{-1} (código Referencia 1) como se ha dicho antes esto se debe a la abundancia que posee este elemento en la naturaleza y la poca intervención del hombre en este sector.

En el diagrama de cajas del anexo III se puede apreciar de mejor forma los usos de suelo que poseen las mayores concentraciones para cada elemento. En este proyecto se ha trabajado con la mediana de los elementos ya que es menos susceptible que la media frente a los valores extremos.

- En la figura 38 el suelo Industrial posee una mayor concentración de Arsénico con una mediana de 263 mg kg^{-1} .
- En la figura 39 el suelo Peri-Urbano posee una mayor concentración de Boro con una mediana de 58.1 mg kg^{-1} .
- En la figura 40 el suelo Vía Férrea posee una mayor concentración de Calcio con una mediana de 4.4 mg kg^{-1} .
- En la figura 41 el suelo Industrial posee una mayor concentración de Cobalto con una mediana de 89.9 mg kg^{-1} .
- En la figura 42 el suelo Peri-Urbano posee una mayor concentración de Sodio con una mediana de 6.4 mg kg^{-1} .
- En la figura 43 el suelo Peri-Urbano posee una mayor concentración de Fosforo con una mediana de 9790 mg kg^{-1} .
- En la figura 44 el suelo Peri-Urbano posee una mayor concentración de Azufre con una mediana de 92.3 mg kg^{-1} .

4.6 Análisis geología de Arica

Al igual que el mapa de usos de suelo se conformó un mapa con las rocas en donde reposa la ciudad de Arica (ver figura 2).

Una vez separados los distintos usos de roca se realizó un trabajo estadístico el cual se puede ver en la tabla 10 la cual posee los mismos ítems que en la tabla de usos de suelo (Rango, Media, Mediana y Desviación Estándar).

Observando el mapa y nuestra tabla 10 es fácil apreciar que la mayoría de los puntos se condensa en la roca llamada Qf aquí se encuentran 236 puntos de los 399 muestreados. En este tipo de roca destaca el calcio junto con el Sodio con una media de 4351 y 2762 mgkg^{-1} respectivamente. Por otro lado las los elementos con menor concentración son el Arsénico y Cobalto con una concentración promedio de 29.2 y 2.5 mgkg^{-1} respectivamente.

En el uso de roca Qa se encuentran 66 puntos muestrales, aquí los elementos que poseen una mayor concentración son Calcio y Sodio registrando un valor de 6418 y 7303 mgkg^{-1} , por otro lado los elementos con menores concentraciones son Cobalto y Arsénico con medias de 3.9 y 14.6 mgkg^{-1} .

Luego tenemos la roca PPI1c con 26 muestras totales, donde las concentraciones máximas las tienen los elementos Cobalto y Sodio registrando valores de 4204 y 3889 mgkg^{-1} respectivamente. Y los elementos con menor concentración Arsénico con 13.0 mgkg^{-1} y Calcio con 4.1 mgkg^{-1} .

Para la roca OM1c con 25 muestras del total, destacan los elementos Calcio y Sodio nuevamente con medias de 4380 y 9437 mgkg^{-1} respectivamente. El elemento con concentración más baja es el Cobalto con una media de 1,1 mgkg^{-1} .

La roca J3i posee un total de 24 muestras de las cuales se registran como el elemento de mayor concentración al Sodio con media de 10591 mgkg^{-1} y como en menor concentración nuevamente el Cobalto con media de 1.4 mgkg^{-1} seguido por el Arsénico con 6.4 mgkg^{-1} .

El uso de roca PPI1r posee un valor más reducido de datos (solo 12 muestras) donde podemos ver que el sodio es el elemento con mayor concentración posee 13160 mgkg^{-1} como media dejando muy abajo al resto de los elementos en esta área, al contrario el elemento con menor concentraciones el Cobalto que solo registra 3.2 mgkg^{-1} como media.

Por último tenemos la roca Qm la cual posee solo 7 datos en la cual se registran como altas concentraciones el elemento Calcio y el Sodio con medias de 4930 y 2352 mgkg^{-1} , como concentración más baja encontramos otra vez al Cobalto con una reducida media de 5.1 mgkg^{-1} .

Del análisis de correlaciones entre las distintas rocas con los elementos (anexo V) podemos decir lo siguiente:

Para el uso de roca Qf solo posee una correlación positiva moderada entre el Cobalto y el Calcio con un valor de 0.58, en general el resto de los elementos posee una correlación moderada o baja (C.V. <0.5) tanto negativa como positivamente.

Para la geología PPI1r encontramos correlaciones entre Co/Ca, Ca/As, Co/As, P/Ca, P/Co y S/P con valores sobre el 0,5 mostrando correlaciones positivas elevadas (en el caso del Co/Ca existe una correlación positiva alta de 0.88), en general todos estos elementos son muy afines entre sí, exceptuando al Boro el cual no presenta afinidad entre ninguno de los elementos estudiados.

Para el uso de roca Qa existe una correlación moderada positiva entre Sodio-Cobalto, Azufre-Cobalto y Azufre-Sodio con valores de 0.54, 0.53 y 0.68 respectivamente, no mostrando ninguna afinidad más entre los demás elementos, los cuales poseen una correlatividad baja positiva y negativamente, según el caso.

Para la geología presentada en la roca J3i solo existe una correlación entre Co/B y S/Na presentando una correlatividad positiva alta sobre el 0.60 los demás elementos presentan correlaciones bajas tanto positivas como negativas.

Om1c presenta elementos con correlatividad negativa alta, este es el caso del Ca/As con una correlación de -0.62, pero también se encuentra una correlación moderada positiva entre S/Na con una correlación de 0.58, no existiendo más correlaciones entre los demás elementos.

Por último para la geología mostrada en PPI1c hay presencia de elementos con moderada-alta correlatividad, todas sobre el 0.50, donde la mayor correlación se encuentra entre el Azufre y Sodio con 0.82, el único elemento que no posee correlación con el resto es el Calcio presentando correlatividad muy baja y negativa en algunos casos.

En el anexo IV se muestran los box-plot donde se comparan para los distintos elementos los 7 usos geológicos, de esto se concluye (en relación a sus medianas):

- En la figura 45 se puede ver que el elemento Arsénico se encuentra más abundante en la roca PPI1r en relación con su mediana.
- En la figura 46 se puede ver que el elemento Boro se encuentra más abundante en la roca Qm en relación con su mediana.
- En la figura 47 se puede ver que el elemento Calcio se encuentra más abundante en la roca PPI1r en relación con su mediana.
- En la figura 48 se puede ver que el elemento Cobalto se encuentra más abundante en las rocas PPI1c y Qm ambas con el mismo valor de la mediana.
- En la figura 49 se puede ver que el elemento Sodio se encuentra más abundante en la roca PPI1r en relación con su mediana
- En la figura 50 se puede ver que el elemento Fosforo se encuentra más abundante en la roca Qf en relación con su mediana.
- En la figura 51 se puede ver que el elemento Azufre se encuentra más abundante en la roca J3i en relación con su mediana.

Id geológico	SPM	Parámetro	As	B	Ca	Co	Na	P	S
			(mg kg-1)	(mg kg-1)	(mg kg-1)	(mg kg-1)	(mg kg-1)	(mg kg-1)	(mg kg-1)
OM1c (n:25)	Rango	3.0-50.9	5.8-7.8	828-9932	0.01-3.3	1103-53993	1077-6139	206-4038	
	promedio	9,4	29,1	4380	1,1	9437	2054	1279	
	SD	9,1	17,9	2165	0,6	11499	1209	1132	
	mediana	7,6	23,7	3937	1,1	5768	1684	689	
ppl1c (n:26)	Rango	7.8-25.3	6.2-112	1507-11190	0.6-6.9	202-24113	1051-3096	98.3-17	
	promedio	13,0	46,9	4204	4,1	3889	2192	427	
	SD	4,1	39,7	2797	2,0	6569	462	422	
	mediana	11,7	29,5	2930	4,9	1109	2049	219	
Qm (n:7)	Rango	7.2-30.6	9.4-195	2682-9882	3.7-7.1	781-4159	1563-2589	146-2840	
	promedio	15,1	72,4	4930	5,1	2352	2095	849	
	SD	9,4	60,7	2383	1,2	1173	315	1087	
	mediana	10,8	49,8	4455	4,9	2287	2097	224	
J3i (n:24)	Rango	1.0-14.5	8.9-68.0	2694-13072	0.0-2.6	756-49842	1577-7118	406-5086	
	promedio	6,4	27,3	6857	1,4	10591	3181	1800	
	SD	3,5	12,6	3249	0,7	11373	1848	1315	
	mediana	5,8	26,5	5631	1,5	7821	2222	1509	
PPI1r (n:12)	Rango	11.9-46.7	20.5-56.9	516-19190	0.4-5.4	5733-22868	739-2783	300-2719	
	promedio	23,0	35,5	8104	3,2	13160	1529	1307	
	SD	10,3	12,2	4582	1,5	6843	574	909	
	mediana	19,1	33,9	7635	3,3	11134	1458	795	
Qa (n:66)	Rango	5-183	0.3-63.6	810-17804	0.9-10.3	647-22871	550-7640	267-5572	
	promedio	14,6	29,7	6418	3,9	7303	2146	1581	
	SD	22,3	12,4	3116	1,8	4891	1107	1202	
	mediana	10,3	28,7	6508	3,8	6776	1961	1440	
Qf (n:236)	Rango	0.1-1036	3.3-1423	8.9-21414	0-6.9	330-35387	11.7-13151	7.6-27684	
	promedio	29,2	63,7	5387	2,5	4300	2477	1600	
	SD	116	103	3959	1,8	4555	1756	3574	
	mediana	11,9	43,3	4351	1,6	2762	2147	671	

Tabla 10: Estadísticos de Usos de Roca Geológicos.

4.7 Resultados Métodos de Contaminación en los Suelos.

Para estimar los índices de contaminación en el suelo de Arica se presentan tres métodos distintos, conocidos como Valores de Fondo o Background Values, además de otros dos métodos los cuales nos indican si el suelo necesita una oportuna intervención debido a su índice de contaminación (Polluted Values).

		As	B	Ca	Co	Na	P	S
backgroundvalues	Mean ± 2SD	19.2	93.1	11731	6,3	11931	3428	2715
	Median ± 2MAD	17.4	68	9653	5,6	8332	3053	1506
	Target value	29,0	ND	ND	9,0	ND	ND	ND
PollutedValues	Upper whisker	23,8	124	15176	8,9	15380	4210	3679
	Intervention Value	55,0	ND	ND	240	ND	ND	ND

ND: Valor no disponible

Tabla 11: Valores Umbrales en mgkg^{-1} para cálculo de proporciones de métodos.

De la tabla 11 podemos ver que los valores más altos en el primer método son el Calcio y el Sodio al igual que en el segundo método de Background Values, sus altos valores pueden tener relación con la abundancia de este elemento en la naturaleza.

Para el caso de los Polluted Values, consideraremos el Upper Whisker ya que el intervention value no se posee la información necesaria de los elementos en estudio, en Upper whisker se puede ver que los valores de umbral son altos para el caso del Calcio y del Sodio en comparación al resto de los elementos en estudio, sin embargo en Arsénico y Cobalto los valores de referencia son mayores (sobre todo en el caso del Cobalto siendo casi 20 veces mayor al Upper Whisker).

Como se puede apreciar en la tabla 12 en los background values los mayores índices de muestras contaminadas se encuentran en el método uno "Mean \pm 2SD", donde el elemento con más muestras contaminadas es el Sodio con un 6.1% de las muestras contaminadas. En el caso del target value no se registran valores comparativos para la mayoría de los elementos (solo para Arsénico y Cobalto), por lo cual no se puede concluir sobre el estado de contaminación de las muestras estudiadas.

Para el caso de los Polluted Values, vemos que por el método del Upper Whisker el cual representa todos aquellos valores atípicos que encontramos en el bigote superior del boxplot donde, solo sobresale el Fosforo con un 10.0% de alteraciones en sus muestras y en segundo lugar el Arsénico con un 9.0% de muestras atípicas.

		As	B	Ca	Co	Na	P	S
backgroundvalues	Mean \pm 2SD	2.2	5,3	3.3	2.0	6,1	4.2	5,3
	Median \pm 2MAD	16.0	22.1	14.5	5.0	21.6	17.3	30.3
	Target value	6,0	ND	ND	0,75	ND	ND	ND
PollutedValues	Upperwhisker	9,0	5,5	2,3	0,75	6,0	10,0	5,5
	InterventionValue	3,3	ND	ND	0,00	ND	ND	ND

ND: valor no disponible

Tabla 12: Porcentaje de muestras sobre límite superior de concentraciones de fondo y porcentajes de concentración de datos atípicos en suelos de Arica.

4.8 Distribución espacial de los elementos

Como paso previo a la realización de la interpolación mediante Kriging se realizaron los variogramas para cada elemento. (Ver anexo VII)

Con la ayuda del Software ArcGIS se realizaron los variogramas para los elemento en estudio. En la siguiente tabla resumen se muestran los elementos y los errores registrados (ME, RMSE, ASE, MSE y RMSSE) de cada modelo (Gaussiano, Exponencial y Esférico), con el cual se realizó luego la interpolación por Kriging simple, la selección del mejor modelo se realizó mediante el error RMSE.

Parameter	Model	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
As	Circular	(6,04)	82,1	29,8	(0,27)	3,1
	Spherical	(6,05)	81,6	28,5	(0,24)	2,8
	Exponential	(5,43)	79,5	29,6	(0,14)	2,1
	Gaussian	(5,92)	82,8	29,7	(0,29)	3,5
B	Circular	(0,81)	97,6	63,9	(0,01)	1,1
	Spherical	(0,93)	96,7	63,1	(0,00)	1,1
	Exponential	(0,46)	85,1	61,9	(0,00)	1,1
	Gaussian	(0,70)	99,4	64,1	(0,01)	1,2
Ca	Circular	10,15	2932	2957	0,01	0,98
	Spherical	14,29	2915	2929	0,01	0,99
	Exponential	11,89	2937	2814	(0,01)	1,1
	Gaussian	12,60	2931	2938	0,01	0,98
Co	Circular	(0,03)	1,14	0,96	(0,04)	1,1
	Spherical	(0,04)	1,14	0,93	(0,04)	1,2
	Exponential	(0,04)	1,18	0,76	(0,06)	1,5
	Gaussian	(0,03)	1,14	0,96	(0,03)	1,2
Na	Circular	125	6038	6112	0,01	1,0
	Spherical	126	6067	6123	0,00	1,1
	Exponential	129	6071	6118	0,01	1,1
	Gaussian	127	6028	6108	0,01	1,1
P	Circular	(115)	3129	1447	(0,09)	2,1
	Spherical	(114)	3128	1433	(0,09)	2,1
	Exponential	(123)	3109	1351	(0,11)	1,8
	Gaussian	(116)	3135	1435	(0,10)	2,1
S	Circular	(50,5)	2330	1798	(0,05)	2330
	Spherical	(48,3)	2325	1776	(0,04)	1,3
	Exponential	(34,4)	2314	1699	(0,06)	1,4
	Gaussian	(54,2)	2355	1779	(0,06)	2355

Tabla 13: Registro de errores para seleccionar el mejor modelo.

4.8.1 Distribución del As

Como se ve en la figura 19 el Arsénico se presenta con elevados índices de concentración (niveles sobre 20 mgkg^{-1}) principalmente en la zona portuaria y en el sitio F (zonas rojas) esto puede tener relación por las cargas y descargas en los puertos a granel. En el sector céntrico de la ciudad los índices descienden un poco hasta el rango de $11,2 - 14,5 \text{ mgkg}^{-1}$. Por otra parte los sectores con más bajo índice de contaminación son los extremos de la ciudad principalmente en la zona centro-sur donde se observan rangos que van desde $4,4 - 8,3 \text{ mgkg}^{-1}$, si bien se encuentran varias zonas de la ciudad con altos rangos de contaminación (color rojo y naranja), estos valores se encuentran por debajo del umbral que presenta la norma de los Países Bajos (tabla 11).

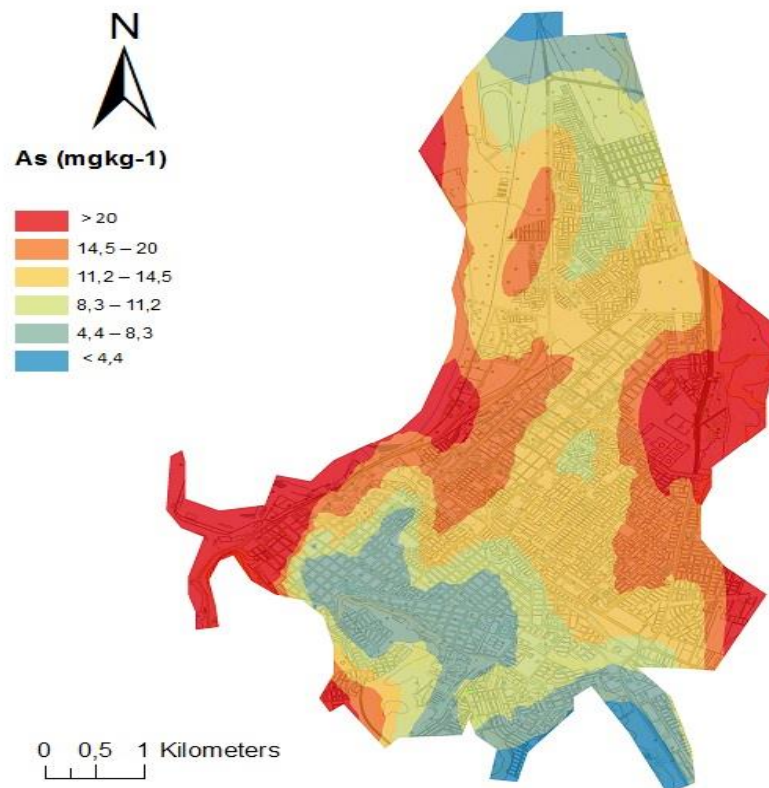


Figura 19: Distribución espacial de concentraciones de As.

4.8.2 Distribución del B

En la figura 20 se muestra a la ciudad de Arica sin índices altos de concentración de Boro, llegando solo hasta un rango de 62,5 – 125 mgkg^{-1} en la zona céntrica de la ciudad (zonas industriales y comerciales). En los alrededores se muestra un área con rangos bajos de concentración. Si bien este elemento se encuentra en mayor cantidad en la zona norte de Chile, no es un elemento que se encuentre libre en la naturaleza por lo cual sus índices son bajos en comparación a otros elementos que si lo están en mayor abundancia como lo es el caso del calcio y azufre.

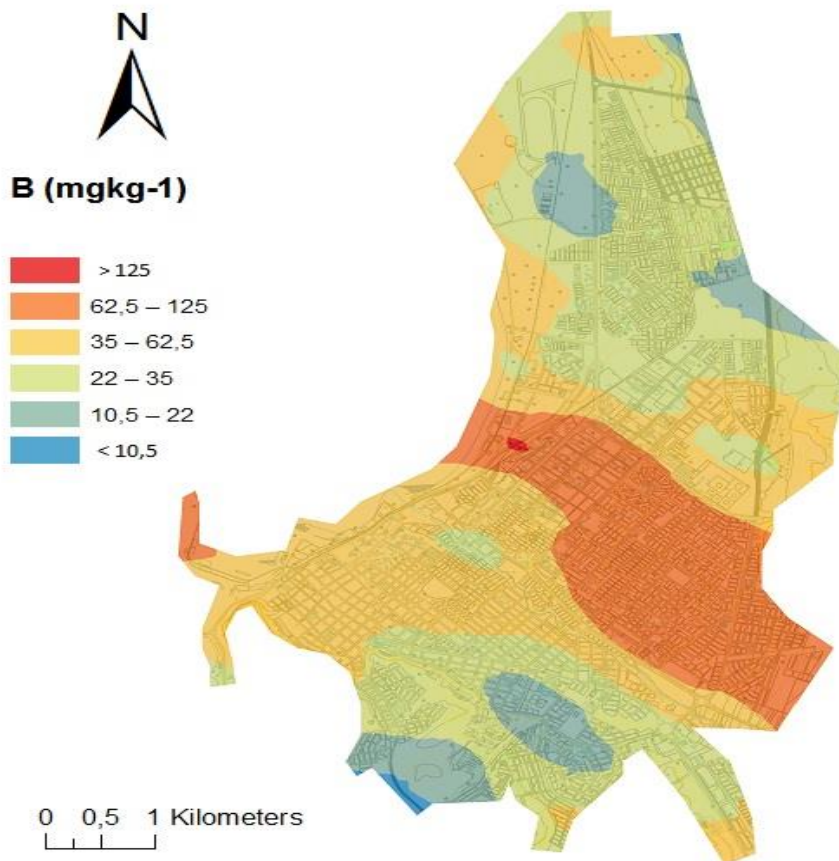


Figura 20: Distribución espacial de concentraciones de B.

4.8.3 Distribución del Ca

Podemos apreciar en la figura 21 que las concentraciones de Calcio en la Ciudad de Arica son moderadamente bajas, sus concentraciones más altas se encuentran cercanas al sitio F y la zona norte de la ciudad (parte de la vía férrea y algunas zonas comerciales del lugar) con un color naranja (rango entre 7705 – 11949 mgkg^{-1}) las zonas con menor índice de contaminación de este elemento se encuentra en el zona céntrica-sur (principalmente la zona residencial) con valores inferiores a los 1175 mgkg^{-1} , las concentraciones de este elemento son bastante altas debido a que se puede encontrar a este elemento libre en la naturaleza ,sin embargo los niveles de concentraciones se encuentran bajo el umbral de la norma de los países bajos (ver norma upper whisker en tabla 11).

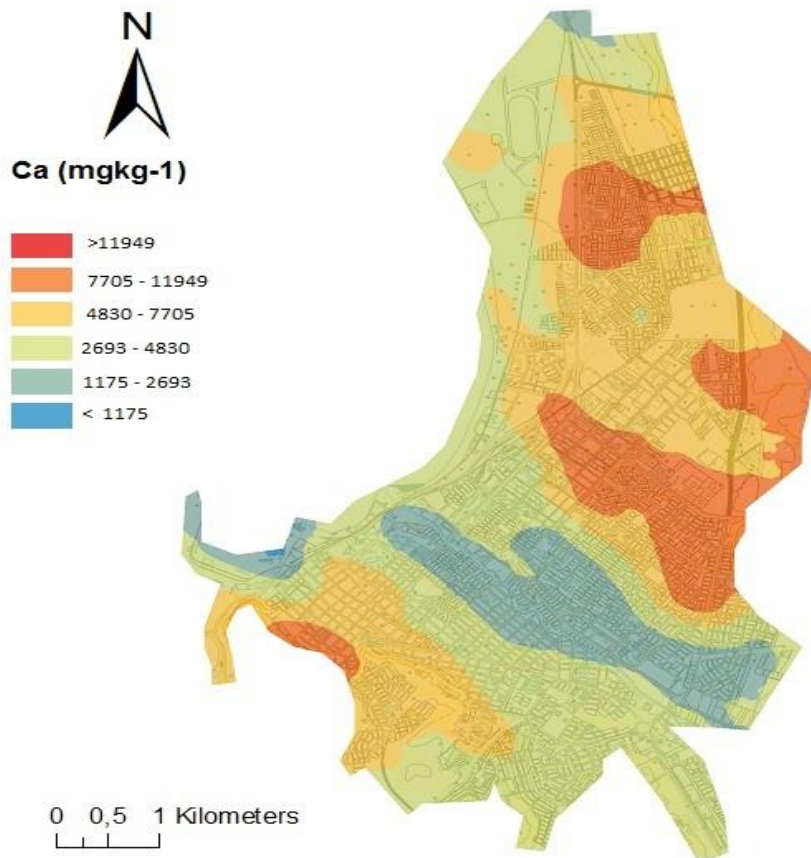


Figura 21: Distribución espacial de concentraciones de Ca.

4.8.4 Distribución del Co

En la figura 22 se puede ver claramente que el foco con la concentración más alta de Cobalto (zona roja) se encuentra en la zona norte de la ciudad (zona residencial) y se extiende hasta la zona céntrica descendiendo un poco sus niveles de concentración (principalmente vía férrea y comercial), más al sur de la ciudad los índices de contaminación son bajos ($0.14 - 2.6 \text{ mgkg}^{-1}$), los índices de contaminación se encuentra bajo los umbrales de los valores de fondo según la norma de los países bajos (tabla 11), el fuerte contraste que se presenta en la ciudad por este elemento puede deberse al viento que circula en dirección sur-oeste, donde solo es afectado el Norte de la ciudad (Sector de Vía Férrea, Comercial y parte de la Industrial).

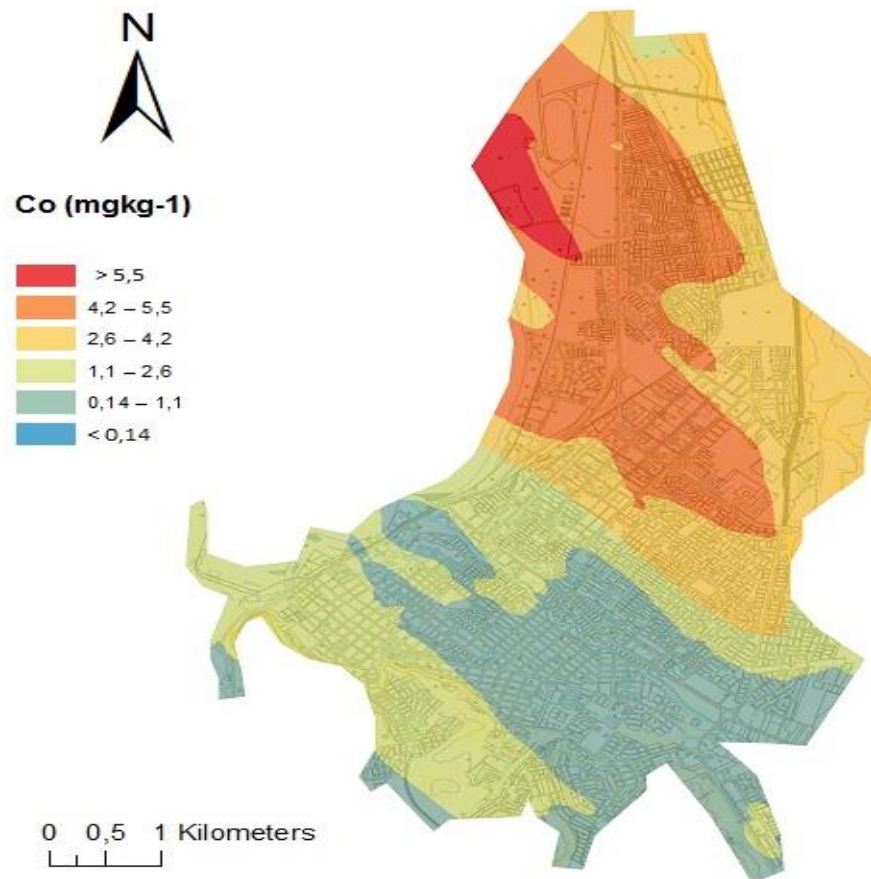


Figura 22: Distribución espacial de concentraciones de Co.

4.8.5 Distribución del Na

En la figura 23 se muestra que las zonas comprometidas con mayores índices de concentración son gran parte del sitio F y la zona Portuaria con valores entre 7101 – 18227 mgkg^{-1} , el área residencial presenta Índices entre 1580- 7101 mgkg^{-1} , la zona del hipódromo y alrededores se encuentran con el menor porcentaje de contaminación con un color azul (concentraciones menores a 789 mgkg^{-1}), tanto las zonas comerciales, industriales y vía férrea poseen los mismos índices de contaminación que el área residencial.

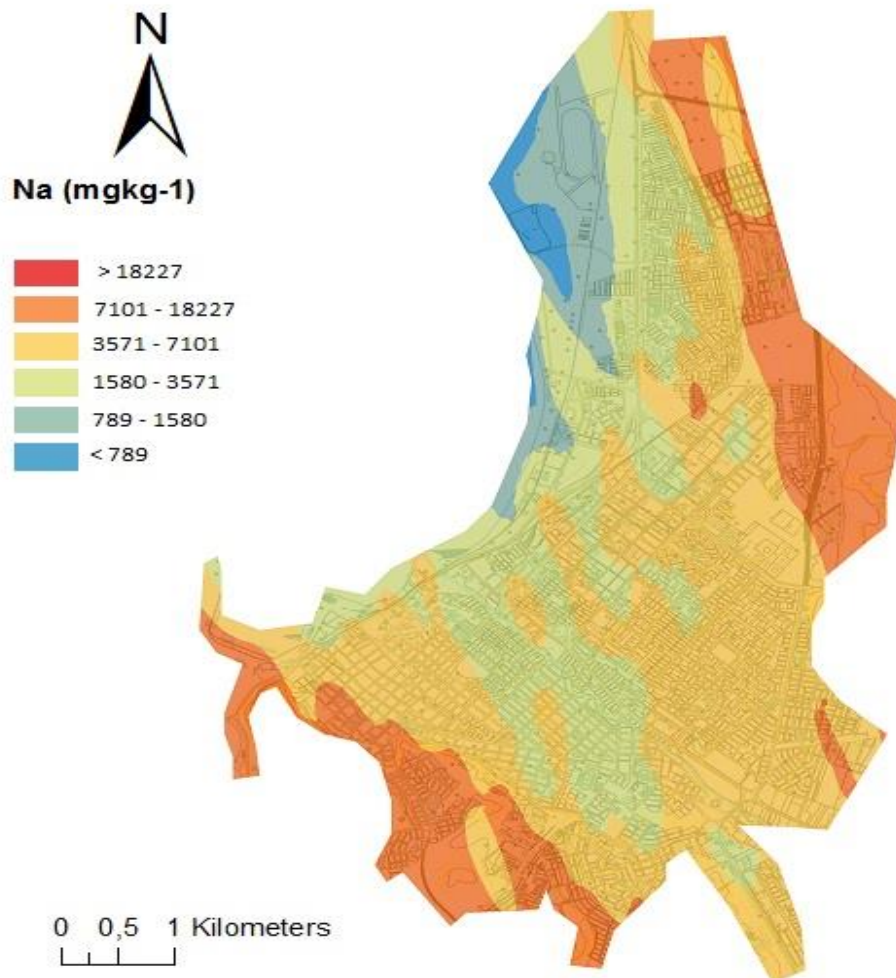


Figura 23: Distribución espacial de concentraciones de Na.

4.8.6 Distribución del P

En la figura 24 se ve que las concentraciones de Fosforo en Arica se presentan más altas en el Área portuaria extendiéndose hasta el sitio comercial y parte del residencial con rangos entre 2627 – 5314 mgkg^{-1} también en la zona extremo norte (suelo Peri-Urbano) se presentan estos mismos índices ,luego más en la zona comercial y parte de la vía férrea se encuentran valores más bajos con concentraciones menores de 1012 mgkg^{-1} , en la zona residencial sur se encuentran concentraciones moderadas de fosforo la cual está entre los valores 2021 – 2627 mgkg^{-1} , por último la zona sitio F y parte de la zona industrial de la ciudad posee valores bajos de contaminación entre 1592 -2021 mgkg^{-1} (color verde).

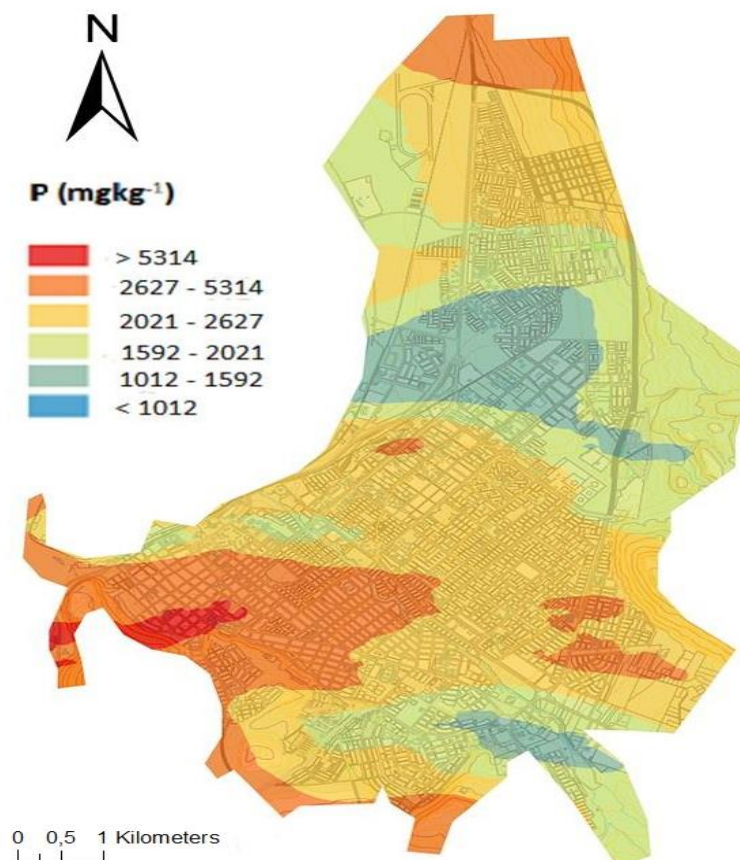


Figura 24: Distribución espacial de concentraciones de P.

4.8.7 Distribución del S

En la figura 25 el Azufre presenta contaminaciones en los extremos de la ciudad, siendo las más afectadas la zona portuaria (color rojo), sitio F y parte del sector Peri-Urbano (color naranja). En la zona del Hipódromo y alrededores se presentan los niveles más bajos de contaminación con valores menores a 103 mgkg^{-1} , para el caso del sector comercial e industrial este se encuentra en un rango de contaminación de $694 - 1736 \text{ mgkg}^{-1}$, el sector Residencial céntrico presenta pocas zonas con un color verde ($443 - 694 \text{ mgkg}^{-1}$), la gran mayoría se encuentra con un nivel de contaminación moderado (color amarillo entre los $694 - 1736 \text{ mgkg}^{-1}$).

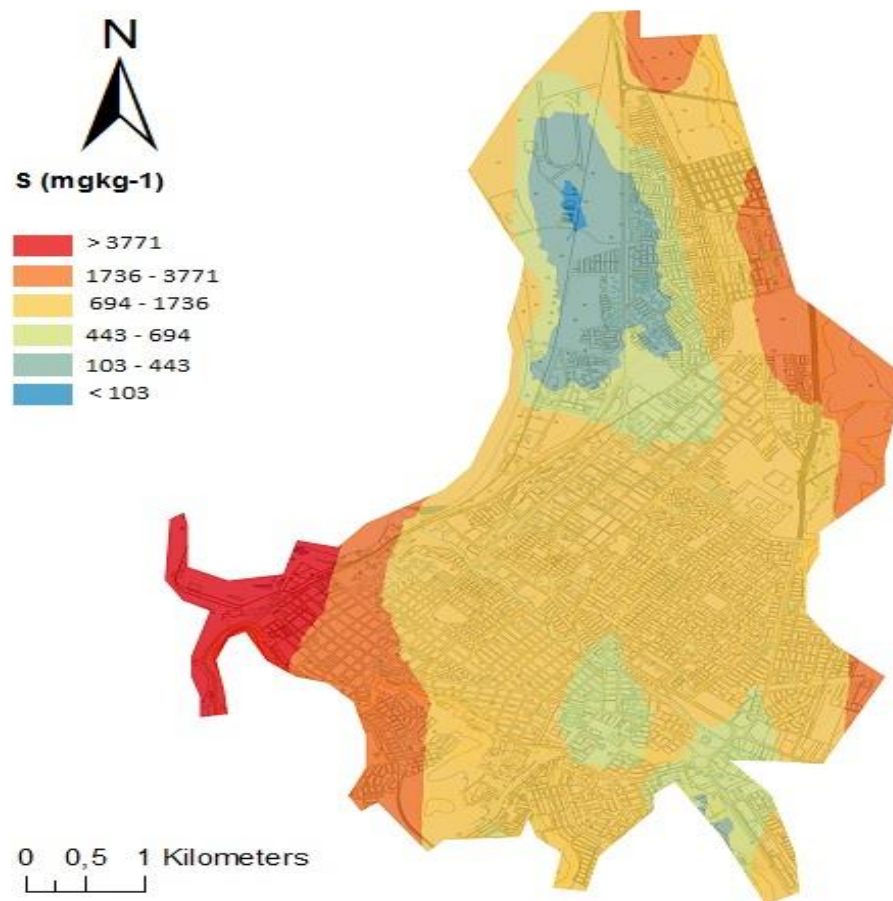


Figura 25: Distribución espacial de concentraciones de S.

Conclusiones

En el siguiente proyecto se ha obtenido la distribución para cada elemento químico en estudio, mediante la técnica del Kriging, el cual se encarga de mostrar para un cierto lugar geográfico (Arica) como es la colocación para cada uno de los elementos.

Los altos valores presentes en algunos de los elementos conllevan a consecuencias graves para la salud de las personas, también así como a los animales, plantas y el suelo, debido al constante contacto con ellos.

Dentro de los metales pesados en estudio encontramos Arsénico y Azufre los cuales en la zona portuaria sus concentraciones son mayores lo cual indica que estos elementos son altamente manipulados.

En Arica a un nivel más céntrico de la ciudad los elementos que se encuentran con mayores concentraciones son Arsénico, Boro y Cobalto, donde también se encuentran otros tipos de suelo como lo son vía férrea, Industrias y sitio F, por otro lado sitio blanco es el uso de suelo el cual presenta los índices más bajos de contaminación de los elementos llegando solo a niveles medios de contaminación (color naranja), lo se puede relacionar a que este lugar no es influenciado de manera antropogénica.

Dentro de los valores de umbral de contaminación presentados por los Países Bajos, encontramos muestras en nuestros elementos de estudio que superan estas cifras, lo cual se interpreta que estamos en presencia de suelos contaminados de manera severa, lo cual conlleva a riesgos para la salud en seres vivos y en el medio ambiente. Por último parte de esta contaminación puede ser ayudada por acción del viento ya que trasporta restos de algunos sedimentos desde el puerto y las costas de Arica hacia el interior y alrededores de la ciudad, aumentando las concentraciones de contaminación en los suelos.

Bibliografía

Agriquem América S.A. 2009. Análisis Químico de suelos en la ciudad de Arica.

Aijmone F., Biasioli M. 2010, Trace Elements in Soils of Urban Areas. Water Air Soil Pollut; 213:121–143.

Arcgis 10.2.1 descripción del software:
<http://www.esri.es/es/productos/arcgis/>

Argyraki A. 2010, Urban soil geochemistry in Athens, Greece: The importance of local geology in controlling the distribution of potentially harmful trace elements. Science of the Total Environment; 482–483; 366–377

Asociación de ecología Española:
<http://www.aeet.org/>

Cai L. 2015 Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and source of arsenic and heavy metals in the agricultural soils in Shunde, Southeast China.189-195

Casas Flores R.2012, El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. 11-14.

Cicchella D. 2014, Assessment of the topsoil heavy metals pollution in the Sarno River basin, south Italy. Environ Earth Sci ; 71:5129–5143

Desaules A.2012, Critical evaluation of soil contamination assessment methods for trace metals. Science of the Total Environment; 120-131.

Dragovic R.2014, Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia), Journal of Cleaner Production; 84. 550 -562

Empresa Portuaria Arica. 2013, Memoria 2013. Retrieved 12 20, 2014, from Empresa Portuaria Arica: <http://www.puertoarica.cl/Web/index.php>

Gallardo A. 2006, Geoestadística. Ecosistemas vol.15 n°3; 48-56

Gobernación Provincia de Arica, Gobierno de Chile (2014). "Información geográfica provincia de Arica".
<http://www.gobernacionarica.gov.cl/geografia.html>

Goovaerls P. 1997, Geostatistics for Natural Resources Evaluation; 127

IAL AMBIENTAL LTDA. 2007, Plan Regulador de la Ciudad de Arica. Declaración Impacto Ambiental, Arica.

Índice de elementos químicos y sus efectos para la salud:
<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/index.htm>

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2012, Resultados xviii Censo de población 2012.

Imperato, M., Adamo, P., Naimo, D., Arienzo, M., Stanzione, D., &Violante, P. 2003, Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*; 124, 247–256.

Isaaks E. and Srivastava R. 1989, *Applied Geostatistics*. 561

Jarva J.2014, Geochemical studies on urban soil from two sampling depths in Tampere Central Region, Finland. *Environ Earth Sci*; 71:4783–4799.

Journel A. & Huijbregts Ch. 1978, *Geostatistics for Environmental Applications*; 538.

Jennings A. 2013, Analysis of worldwide regulatory guidance values for the most commonly regulated elemental surface soil contamination. *Journal of Environmental Management*; 118, 72-95.

Kabata-Pendias A. 2011, *Trace elements in soils and plants*. CRC.

Mamat Z. 2014, Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China. 1098-1111

Matschullat J. 2012, A soil geochemical background for northeastern Brazil. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v.12; p197-209.

Mode E. 1990, *Elementos de Probabilidad y estadística*.79-80

Myers D.E.1987, Optimization of sampling locations for variogram calculations. *Water resources Research*; 23(3):283-293

Oliver M. A. 2014, tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*; 113, 56–69.

Peltola P. & Astroem M. 2003, Urban geochemistry: a multimedia and multi element survey of a small town in northern Europe; 397–419.

Peña J. 2006, Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio: Entrada, manejo, análisis y salida de datos espaciales. Teoría general y práctica para ESRI ArcGIS 9" 2º Edición. Dpto. de Ecología, Universidad de Alicante. Ed. Club Universitario.

Petitgas P. 1996, Geostatistics and Their Applications to Fisheries Survey Data 5. In: B. A. Megrey & E. Mosknes, (E). *Computers and Fisheries Research*. Chapman-Hall, Londres; 114-142

Ramos-Miras. 2014, Influence of parent material and soil use on arsenic forms in soils: A case study in the Amblés Valley (Castilla-León, Spain) *Journal of Geochemical Exploration*; 147, 260–267.

Redon P, Bur T, Guiresse M, Probst J, Toiser A, Revel J. 2013, Modelling trace metal background to evaluate anthropogenic 2013.contamination in arable soils of south-western France; 112-122.

República de Chile I. Municipalidad de Arica Secplan. Plan Regulador de la ciudad Arica 2003; 23.

Ross S. 2007, *Introducción a la Estadística*. España Ed. Reverté; 1-13

Schucknecht A. 2012, Pedogeochemistry in NE-Brazil — Compared to Australia and Europe; 342–356.

Sierra C. 2007, Azufre Elemental como Corrector del pH y la Fertilidad de Alfucos Suelos de la III y IV Región de Chile. Agricultura Técnica (Chile); 173-181

Tume P, King R, González E, Bustamante G, Reverter F, Roca N, et al. 2014, Trace element concentrations in schoolyard soils from the port city of Talcahuano, Chile. Journal of Geochemical Exploration; 8.

Vargas A. 1995, Estadística Descriptiva e Inferencial; 35; 90

Volke T, Velasco J, De la Rosa D.2005, "Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su medición" Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología Ciudad de México.

Wackemagel H. 2013, Multivariate Geostatistics; 35-38

Wang Q. 2015, Accumulations of copper in apple orchard soils: distribution and availability in soil aggregate fractions. J Soils Sediments; 15:1075-1082

Anexos

Anexo I
Correlaciones para estudio de Valores Duplicados.

		original	duplicado
Spearman's rho	Correlation Coefficient	1,000	,820**
	As original Sig. (bilateral)	.	,000
	N	43	43
	Correlation Coefficient	,820**	1,000
	As duplicado Sig. (bilateral)	,000	.
	N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 14: Correlación de Spearman para el Arsénico (As).

		original	duplicado
Spearman's rho	Correlation Coefficient	1,000	,905**
	B original Sig. (bilateral)	.	,000
	N	43	43
	Correlation Coefficient	,905**	1,000
	B duplicado Sig. (bilateral)	,000	.
	N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 15: Correlación de Spearman para el Boro (B).

		original	duplicado
Spearman's rho	Correlation Coefficient	1,000	,921**
	Ca original Sig. (bilateral)	.	,000
	N	43	43
	Correlation Coefficient	,921**	1,000
	Ca duplicado Sig. (bilateral)	,000	.
	N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 16: Correlación de Spearman para el Calcio (Ca).

			original	duplicado
Spearman's rho	Co original	Correlation Coefficient	1,000	,930**
		Sig. (bilateral)	.	,000
		N	43	43
	Co duplicado	Correlation Coefficient	,930**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	.
		N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 17: Correlación de Spearman para el Cobalto (Co).

			original	duplicado
Spearman's rho	Na original	Correlation Coefficient	1,000	,884**
		Sig. (bilateral)	.	,000
		N	43	43
	Na duplicado	Correlation Coefficient	,884**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	.
		N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 18: Correlación de Spearman para el Sodio (Na).

			original	duplicado
Spearman's rho	P original	Correlation Coefficient	1,000	,678**
		Sig. (bilateral)	.	,000
		N	43	43
	P duplicado	Correlation Coefficient	,678**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	.
		N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 19: Correlación de Spearman para el Fosforo (P).

		original	duplicado
Spearman's rho	Correlation Coefficient	1,000	,919**
	S original		
	Sig. (bilateral)	.	,000
	N	43	43
	S duplicado		
	Sig. (bilateral)	,000	.
	N	43	43

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Tabla 20: Correlación de Spearman para el Azufre (S).

Anexo II
Análisis multivariado según uso de suelo.

Análisis multivariado para uso de suelo Periurbano (número de muestras: 6).

• Correlación

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0.64	1					
Ca	0.32	0.43	1				
Co	-0,51	0.00	-0,59	1			
Na	0.70	0.54	0.89*	-0,41	1		
P	-0,12	-0,26	0.49	0.09	0.31	1	
S	0.32	0.26	0.83*	-0,44	0.83*	0.14	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 21: Correlación de Spearman Uso de suelo Peri-Urbano.

• Análisis Cluster

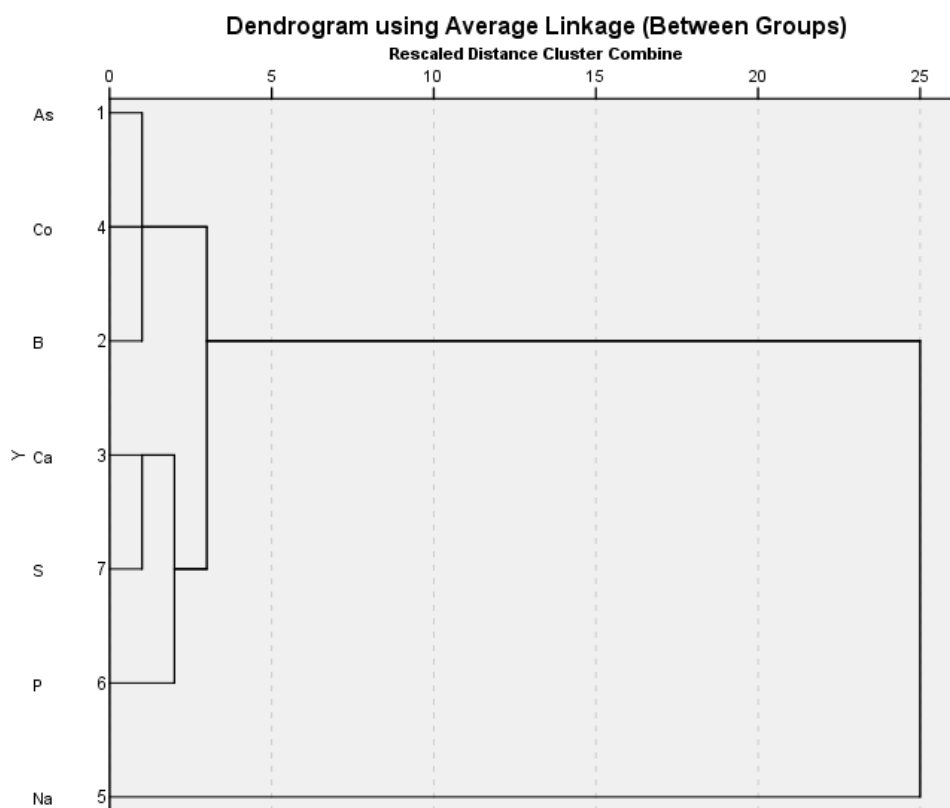


Figura 26: Análisis Cluster para uso de suelo Peri-Urbano.

• Análisis de Componentes Principales.

Metales pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0.21	0.57	0.38	-0.46
B	0.39	0.41	0.24	0.00
Ca	0.49	-0.23	0.05	0.31
Co	-0.17	0.43	0.20	0.82
Na	0.51	0.00	-0.17	0.11
P	0.15	-0.53	0.76	0.04
S	0.50	-0.03	-0.39	0.05
Porcentaje Varianza (%)	50	22	12	12
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	50	71	84	96

Tabla 22: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Peri-Urbano.

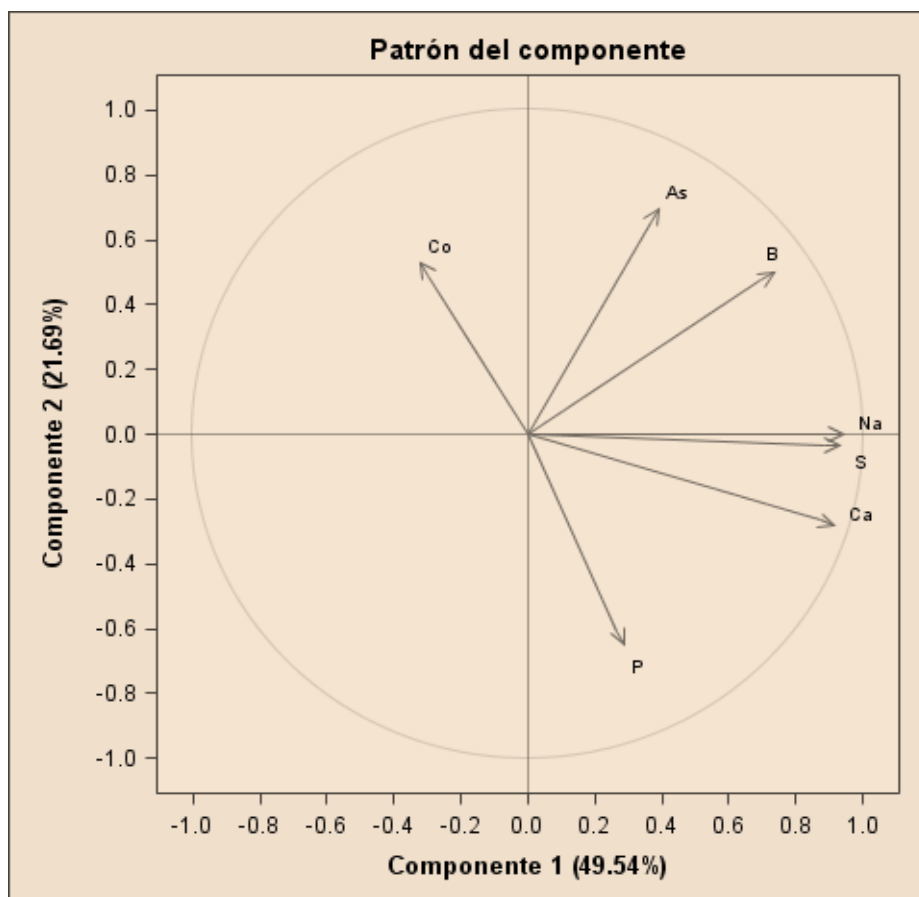


Figura 27: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Peri-Urbano.

Análisis Multivariado para Uso de suelo Comercial (número de muestras: 23).

• Correlación

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0.34	1					
Ca	-0,17	0.26	1				
Co	0.19	-0,16	0.48	1			
Na	-0,23	0.13	0.02	-0,42	1		
P	-0,1	0.30	0.20	-0,43	0.22	1	
S	-0,41	0.11	0.09	-0,39	0.39	0.49	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 23: Correlación de Spearman Uso de suelo Comercial.

• Análisis Cluster

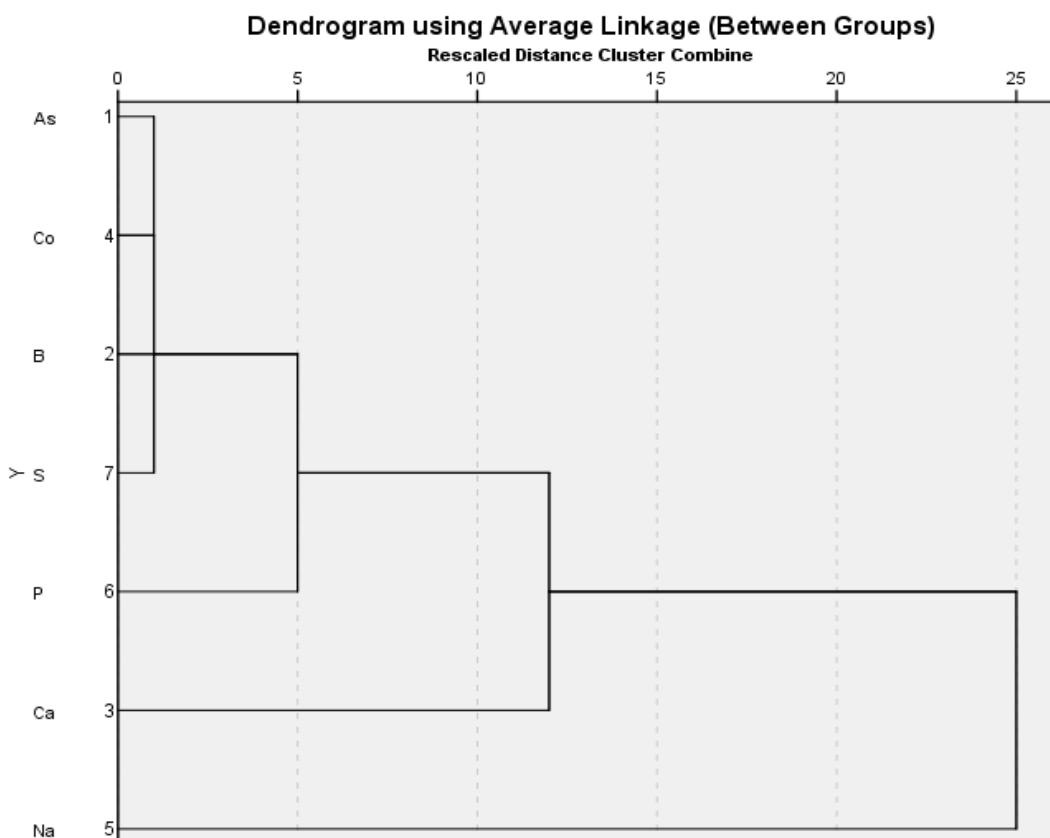


Figura 28: Análisis Cluster para uso de suelo Comercial.

- Análisis de Componentes Principales.

Metales pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0.37	0.30	-0.49	-0.26
B	0.30	0.53	-0.13	-0.38
Ca	0.50	0.30	0.30	0.37
Co	0.54	-0.13	0.30	0.35
Na	-0.22	0.31	-0.53	0.67
P	-0.27	0.47	0.47	-0.19
S	-0.33	0.46	0.24	0.21
Porcentaje Varianza (%)	33	24	15	12
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	33	57	72	84

Tabla 24: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Comercial.

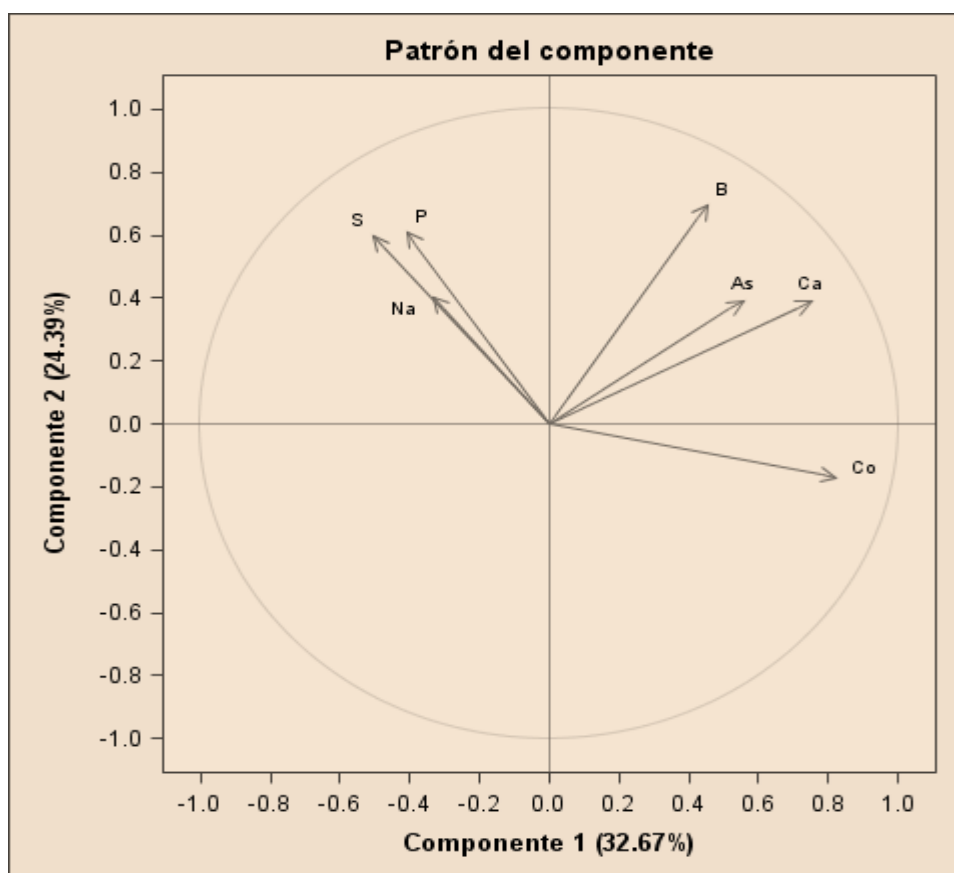


Figura 29: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Comercial.

Análisis Multivariado para Uso de suelo Industrial (número de muestras 31).

- Correlación

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	-0.08	1					
Ca	-0.37*	0.28	1				
Co	-0.23	-0.04	0.75**	1			
Na	-0.24	-0.15	0.50**	0.39*	1		
P	-0.30	0.32	0.50**	0.20	0.39*	1	
S	0.77**	0.38*	-0.30	-0.27	-0.99	-0.15	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 25: Correlación de Spearman Uso de suelo Industrial.

- Análisis Cluster

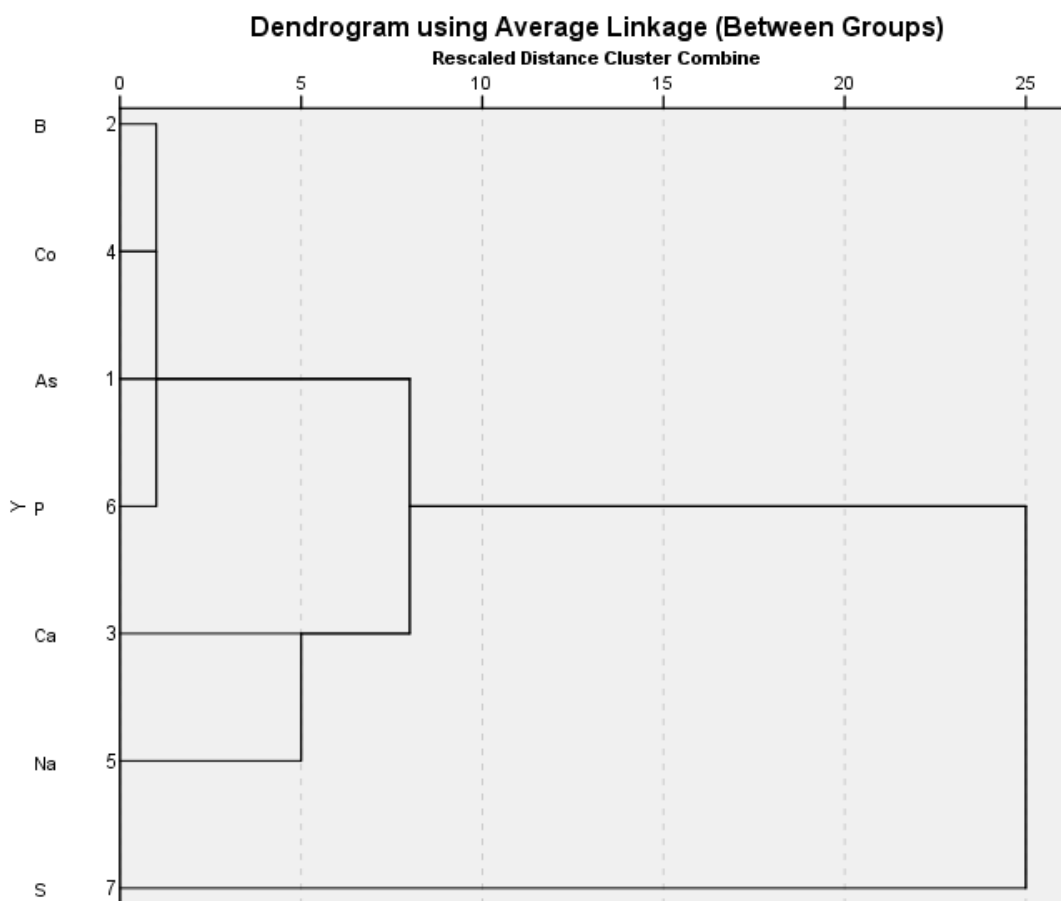


Figura 30: Análisis Cluster para uso de suelo Industrial

- Análisis de Componentes Principales.

Metales pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	-0.45	0.23	-0.11	0.04
B	-0.19	0.09	0.92	0.21
Ca	0.46	0.26	0.27	-0.12
Co	0.33	0.57	0.06	-0.39
Na	0.29	0.33	-0.18	0.88
P	0.29	-0.63	0.17	0.12
S	-0.52	0.19	0.04	0.09
Porcentaje Varianza (%)	45	20	14	10
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	45	66	80	90

Tabla 26: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Industrial.

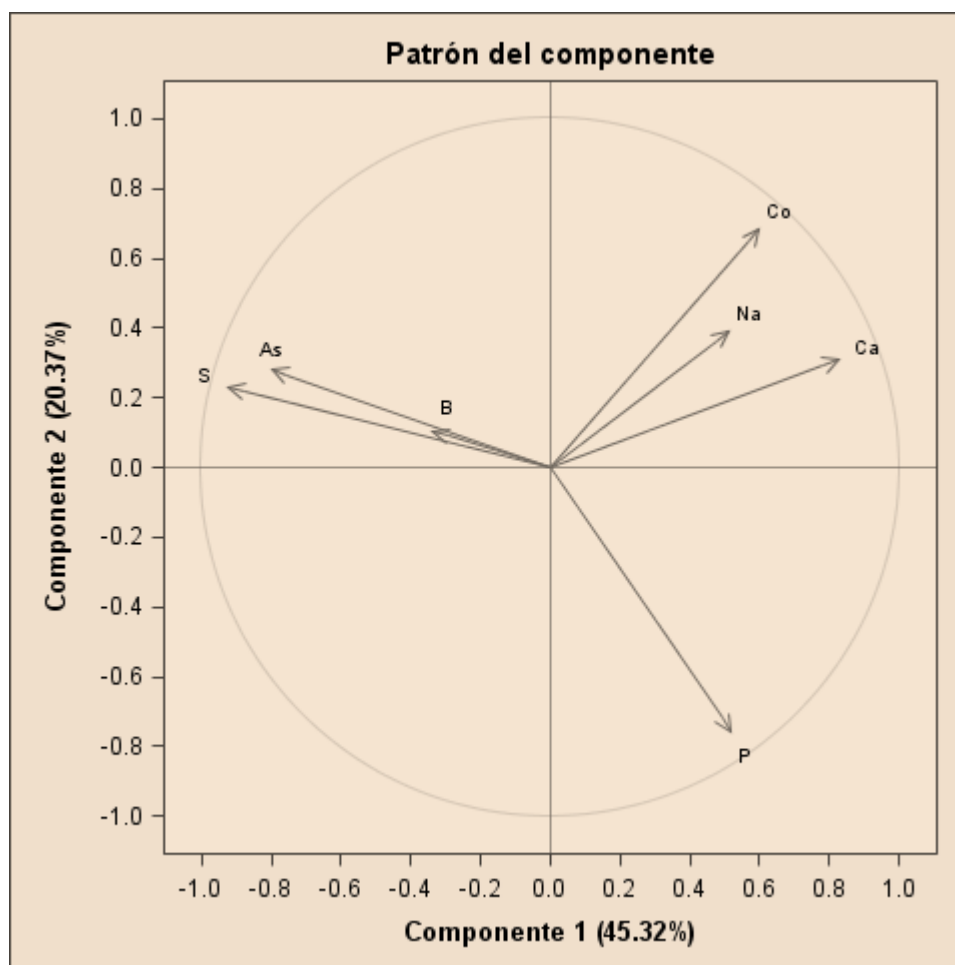


Figura 31: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Industrial.

Análisis Multivariado para uso de suelo Vía Férrea (número de muestras: 31).

- Correlación

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0.23	1					
Ca	0.24	0,36*	1				
Co	-0,20	-0,39*	-0,06	1			
Na	0.22	0.17	0.53**	-0,06	1		
P	-0,14	0.43*	-0,01	0,03	0,02	1	
S	0.57**	0.68*	0,63**	-0,38*	0.51**	0.27	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 27: Correlación de Spearman Uso de suelo Vía Férrea.

- Análisis Cluster

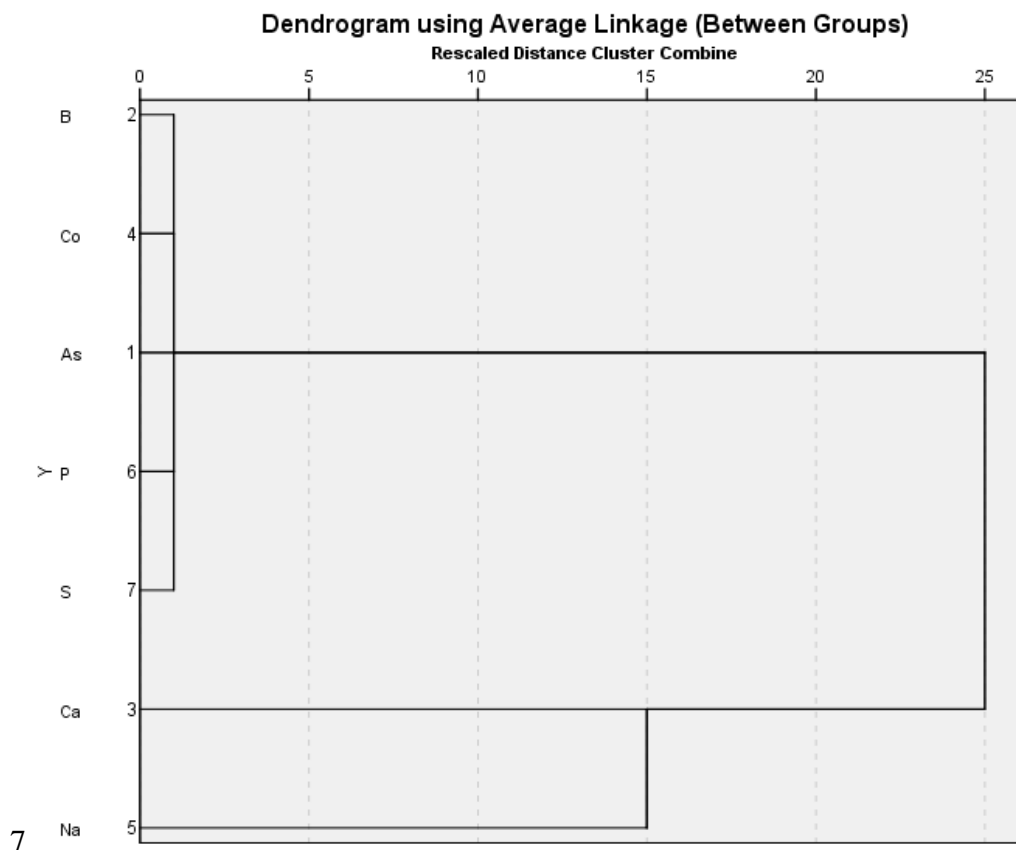


Figura 32: Análisis Cluster para uso de suelo Vía Ferrea.

- Análisis de Componentes Principales.

Metales pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0.54	-0.14	0.22	-0.27
B	-0.01	0.55	-0.45	0.21
Ca	0.34	0.32	0.37	0.55
Co	0.59	0.22	0.19	-0.14
Na	-0.29	-0.25	0.52	0.51
P	-0.23	0.64	0.19	-0.06
S	-0.33	0.25	0.51	-0.54
Porcentaje Varianza (%)	34	23	14	13
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	34	57	71	84

Tabla 28: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Vía Férrea.

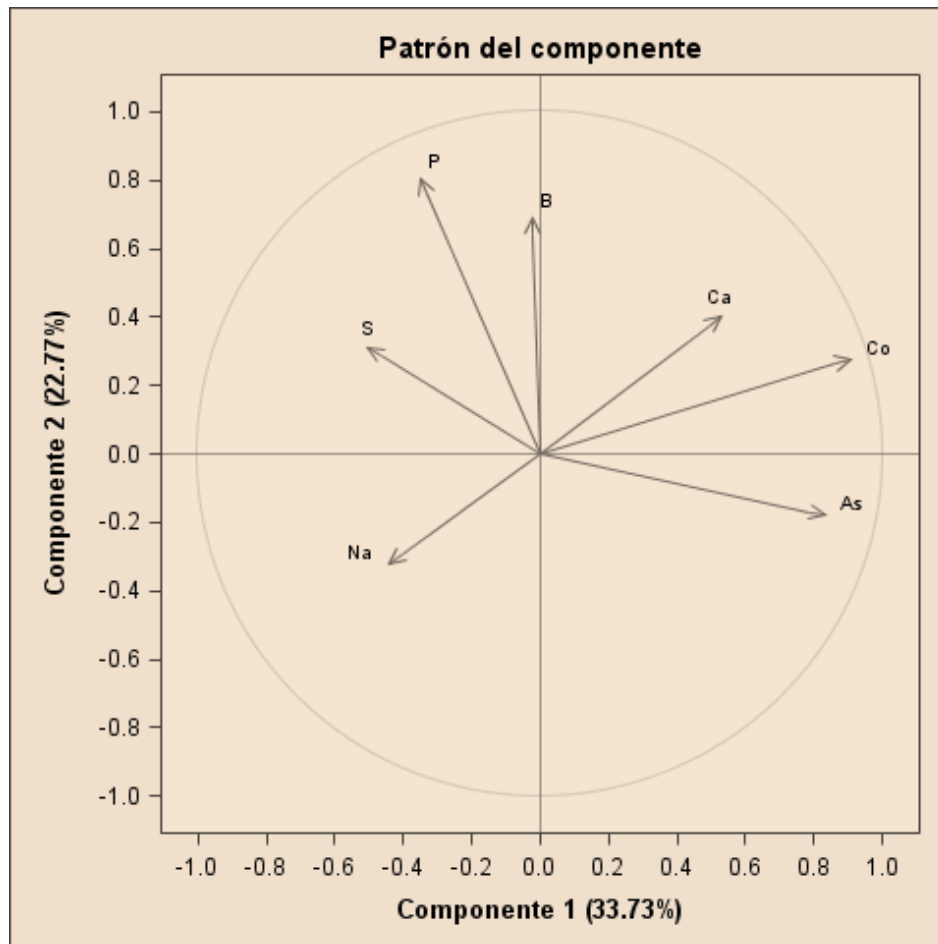


Figura 33: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Vía Férrea.

Análisis Multivariado para uso de suelo Sitio F (número de muestras: 23).

- Correlación

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,34	1					
Ca	0.50*	-0,12	1				
Co	0.47*	0.07	0.58**	1			
Na	-0,07	-0,03	-0,09	-0,45	1		
P	-0,16	0.35	-0,08	0.23	0.1	1	
S	-0,36	0.19	-0,18	-	0.37	0.51*	1
				0,00			

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Tabla 29: Correlación de Spearman Uso de suelo Sitio F.

- Análisis Cluster

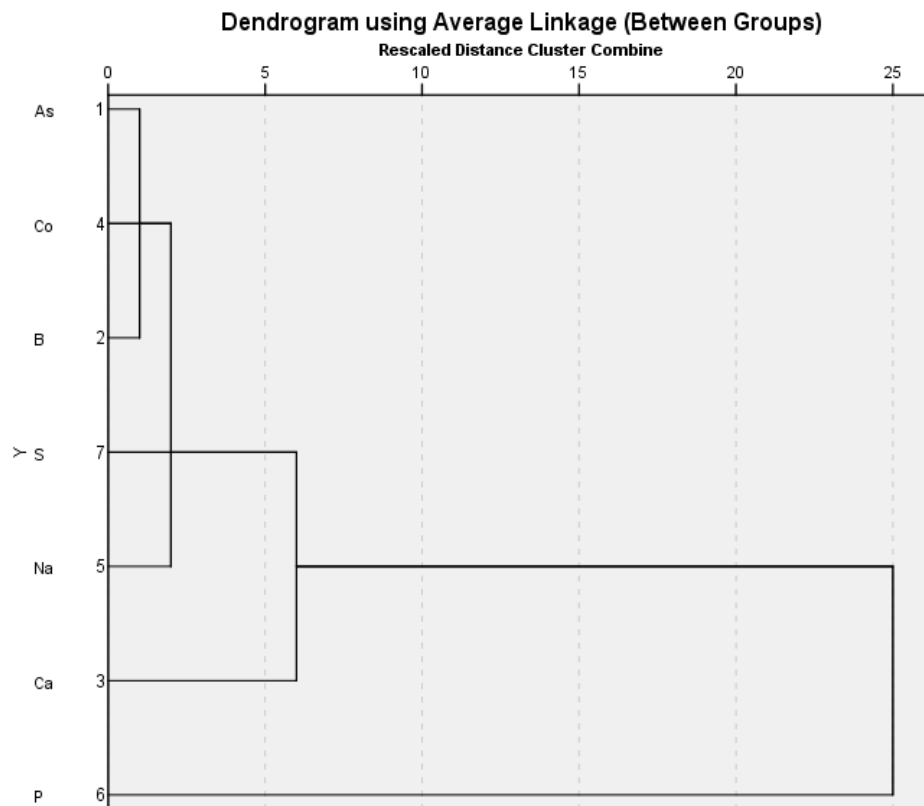


Figura 34: Análisis Cluster para uso de suelo Sitio F.

- Análisis de Componentes Principales

Metales pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0.50	-0.22	0.03	0.12
B	0.45	0.14	0.20	-0.15
Ca	0.08	0.70	-0.09	0.58
Co	-0.14	0.06	0.91	0.25
Na	0.17	0.62	0.07	-0.66
P	0.49	-0.23	0.26	-0.12
S	0.50	0.00	-0.21	0.34
Porcentaje Varianza (%)	48	22	15	8
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	48	70	85	93

Tabla 30: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Sitio F.

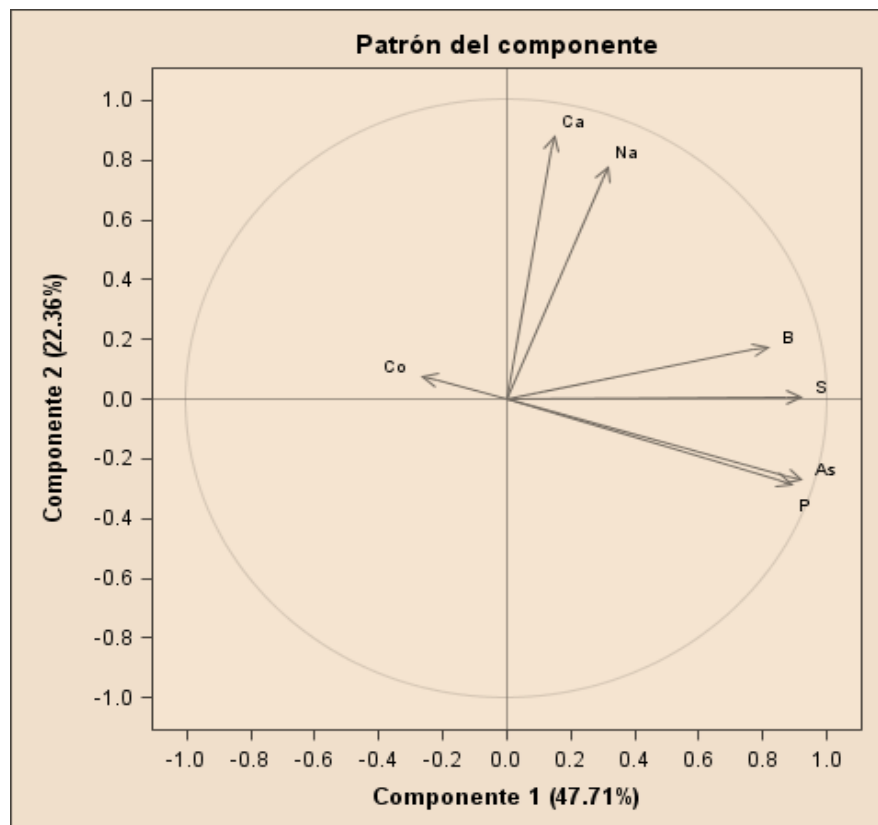


Figura 35: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Sitio F.

Análisis Multivariado Uso de suelo Residencial (número de muestras: 285).

- Correlación

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0.37**	1					
Ca	-0,05	0.00	1				
Co	0.31**	0.02	0.54**	1			
Na	0.01	0.21**	0.23**	-	1		
P	-0,49	0.43**	0.14*	0,67	0.18**	1	
S	-0,08	0.32**	0.27**	0,04	-0,15	0.63*	0.44**
S							1

** La correlación es significativa al nivel 0,01(bilatera

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral

Tabla 31: Correlación de Spearman Uso de suelo Residencial.

- Análisis Cluster

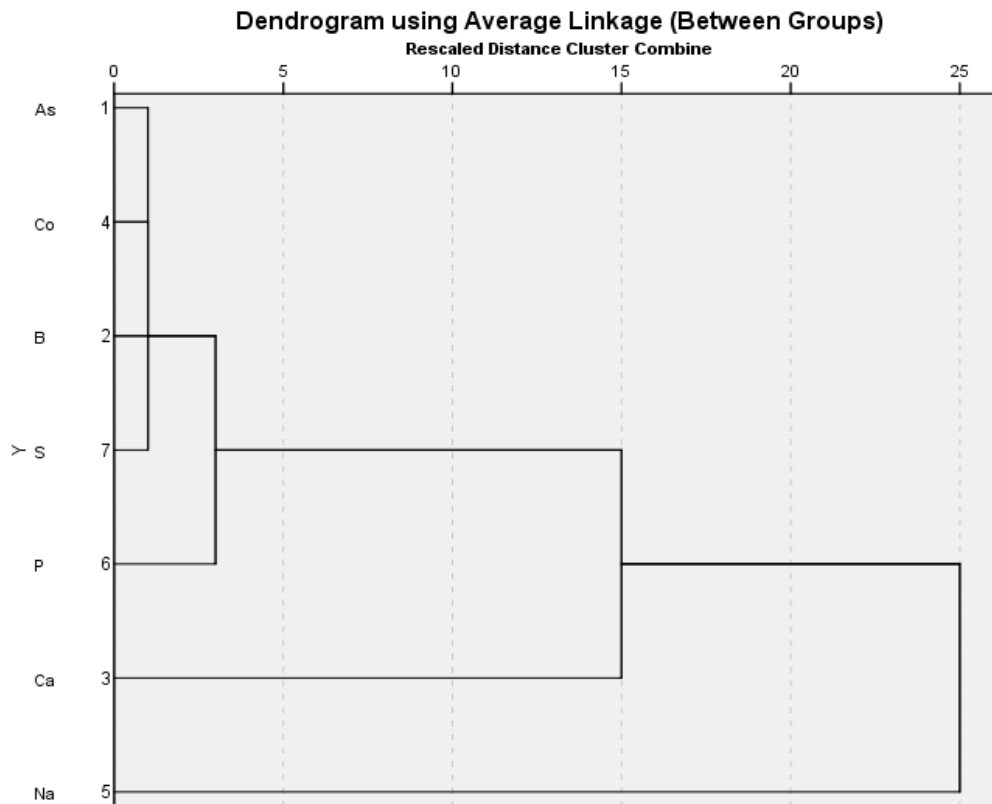


Figura 36: Análisis Cluster para uso de suelo Residencial.

- Análisis de Componentes Principales.

Metales pesados	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	-0.05	0.55	0.48	0.21
B	0.19	0.49	0.44	-0.35
Ca	0.38	0.33	-0.53	0.01
Co	-0.04	0.56	-0.47	0.26
Na	0.45	-0.16	0.24	0.62
P	0.48	-0.05	-0.05	-0.60
S	0.62	-0.12	0.06	0.16
Porcentaje Varianza (%)	27	22	20	14
Porcentaje Varianza Acumulado (%)	27	49	69	83

Tabla 32: Análisis de Componentes Principales para uso de suelo Residencial.

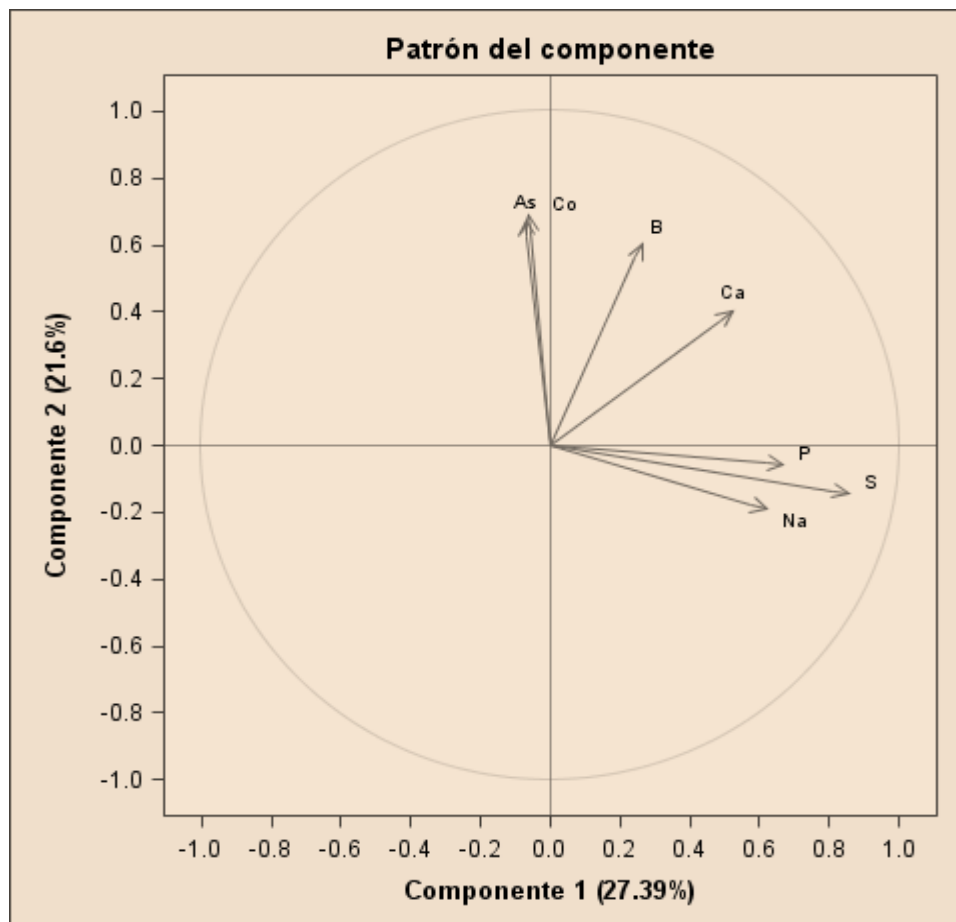


Figura 37: Conductas de los elementos en estudio para uso de suelo Residencial.

Anexo III
Box-Plot de los usos de suelo en función de los elementos de estudio

A continuación se presentan los diagramas de cajas en función del uso de suelo en el cual se encuentra presente el elemento para que así se realice una mejor comparación entre ellos.

Terminología:

VF: Vía férrea.

SF: Sitio F.

RE: Residencial.

IN: Industrial.

CO: Comercial.

PU: Peri-Urbano.

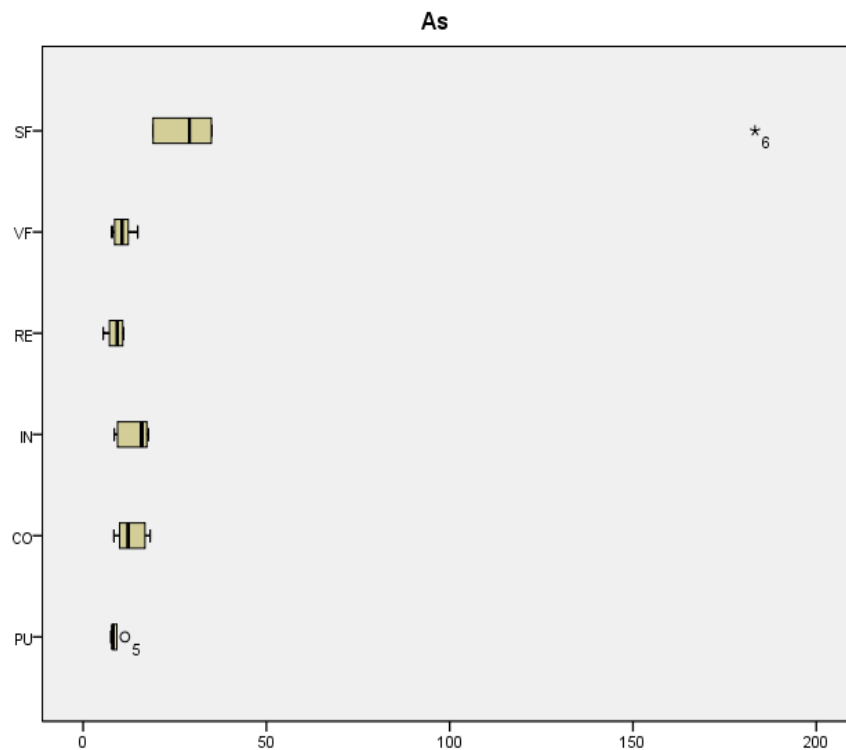


Figura 38: Box Plot del Arsénico para cada uso de suelo.

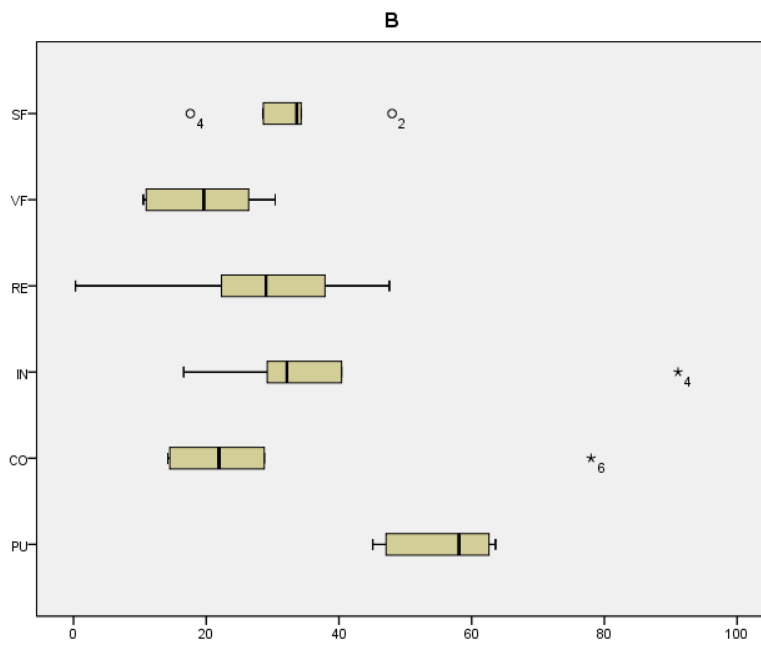


Figura 39: Box Plot del Boro para cada uso de suelo.

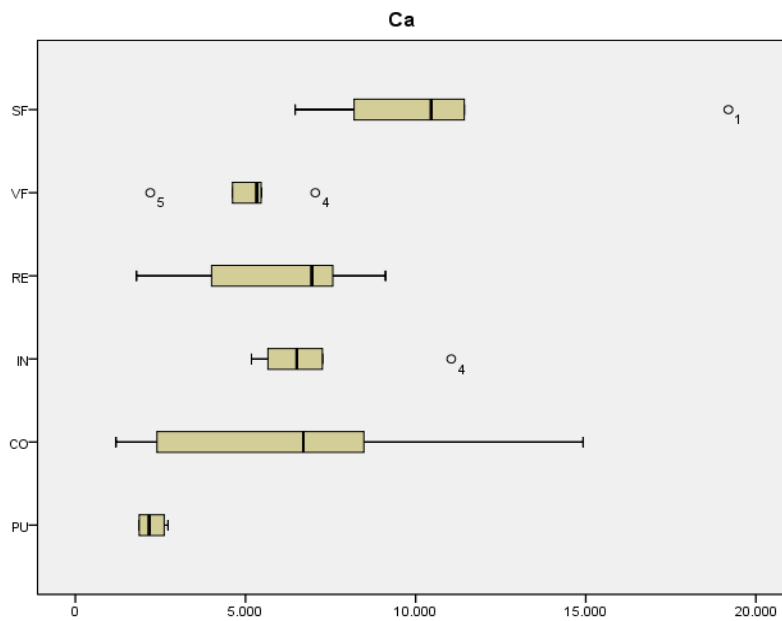


Figura 40: Box Plot del Calcio para cada uso de suelo.

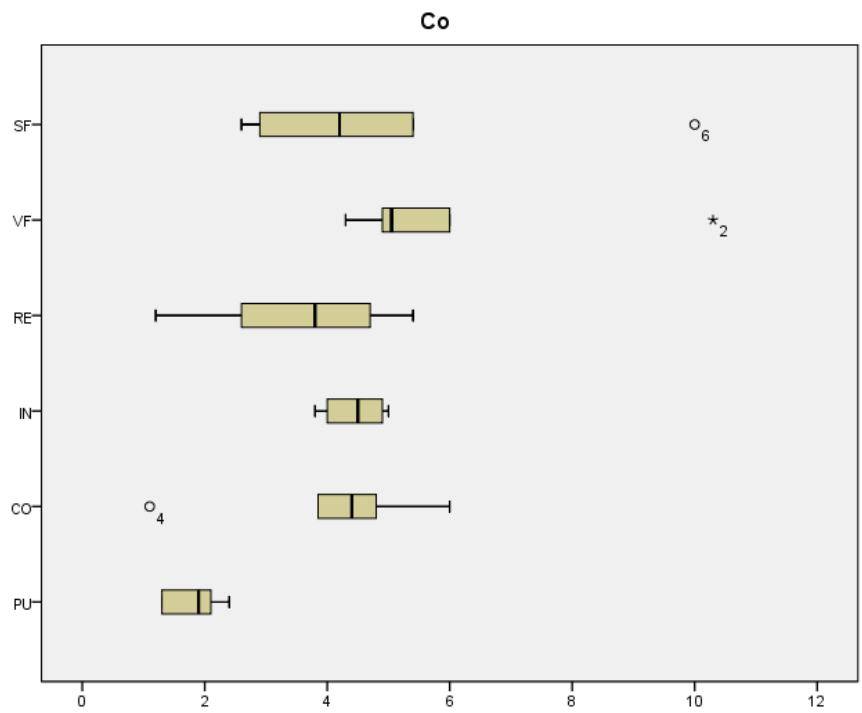


Figura 41: Box Plot del Cobalto para cada uso de suelo.

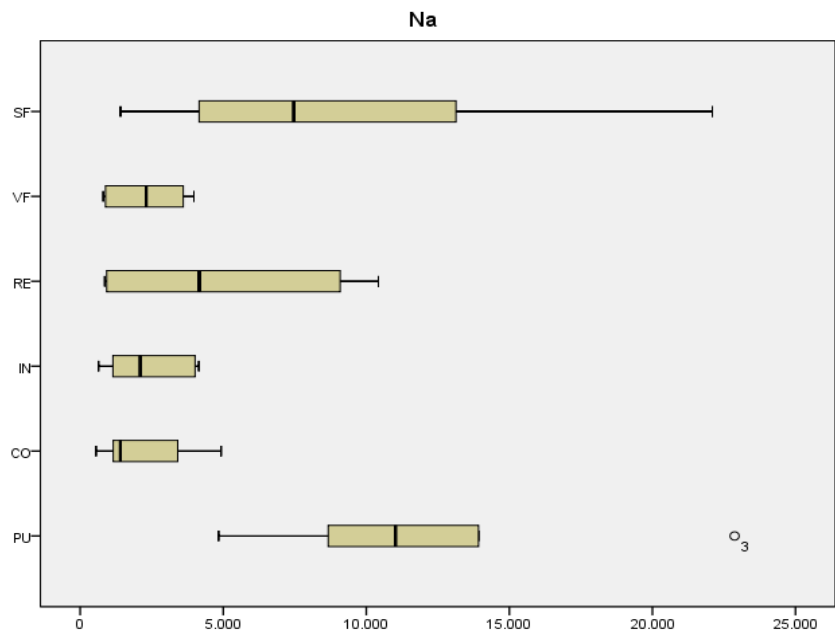


Figura 42: Box Plot del Sodio para cada uso de suelo.

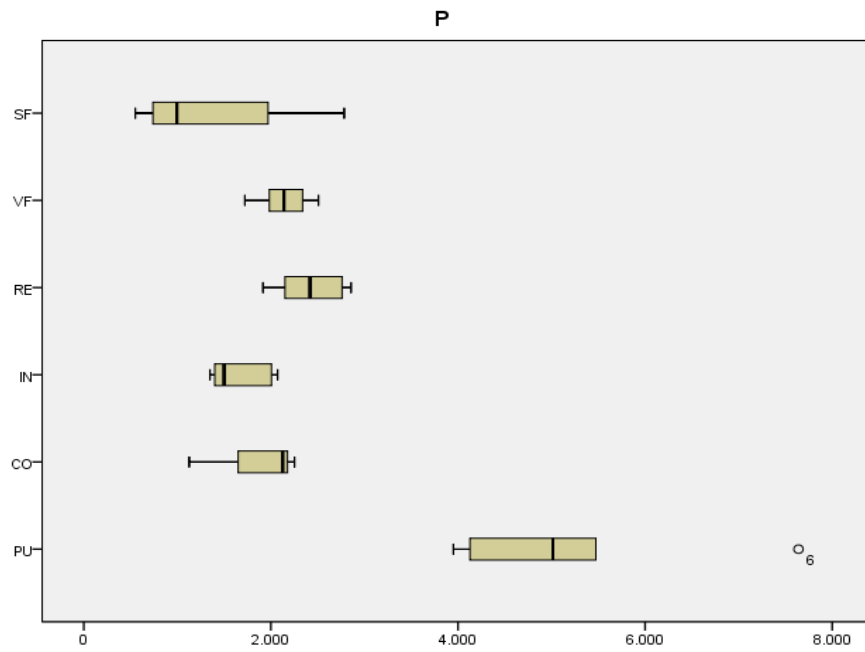


Figura 43: Box Plot del Fosforo para cada uso de suelo.

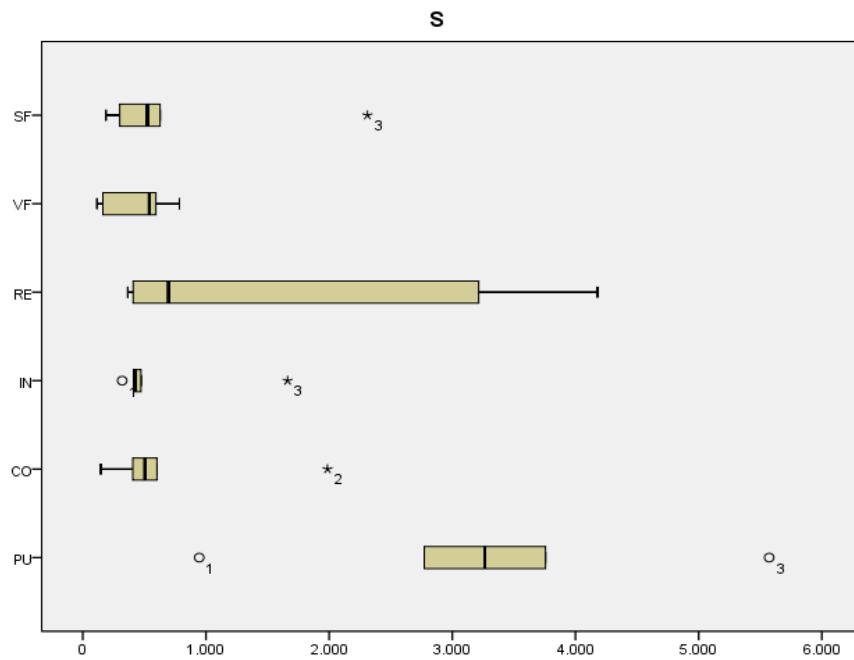


Figura 44: Box Plot del Azufre para cada uso de suelo.

Anexo IV
Box Plot de las Geologías del suelo de Arica para cada Elemento en estudio

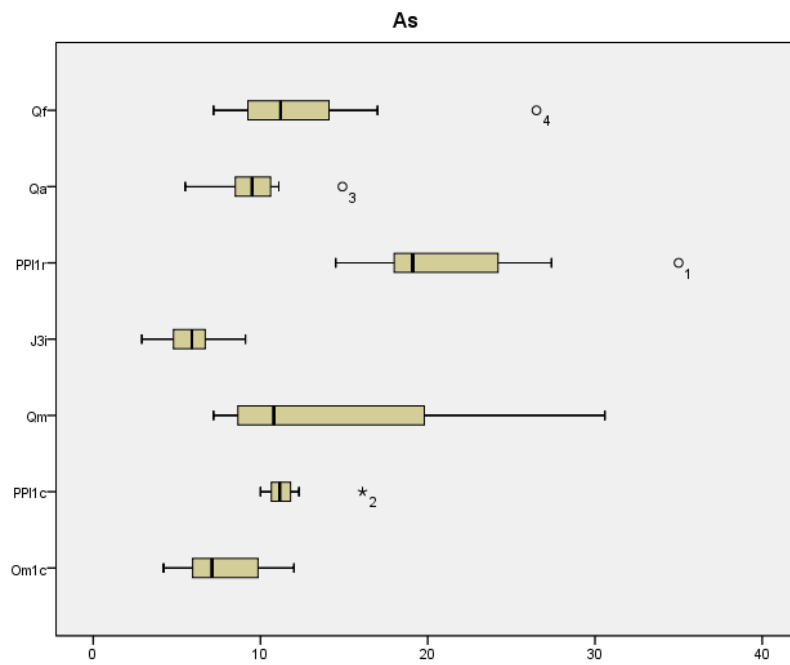


Figura 45: Box Plot Geología de Arica para Arsénico.

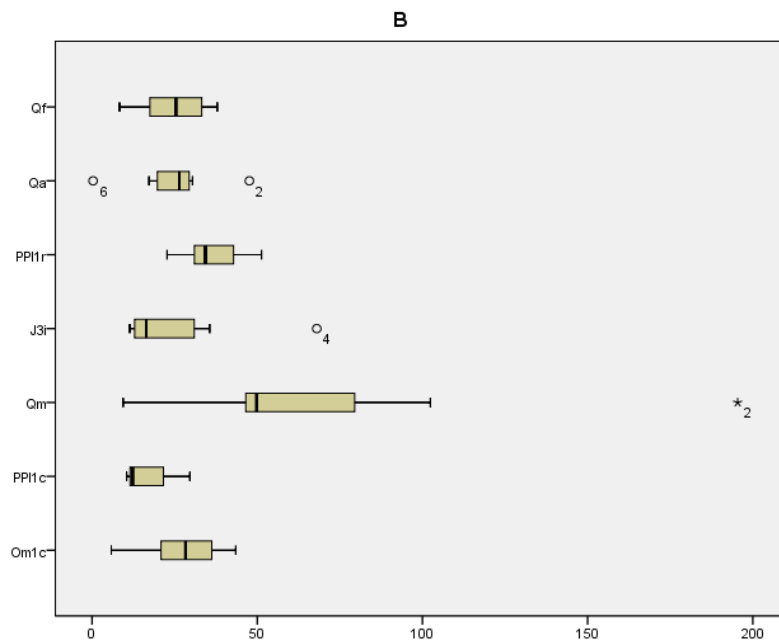


Figura 46: Box Plot Geología de Arica para Boro.

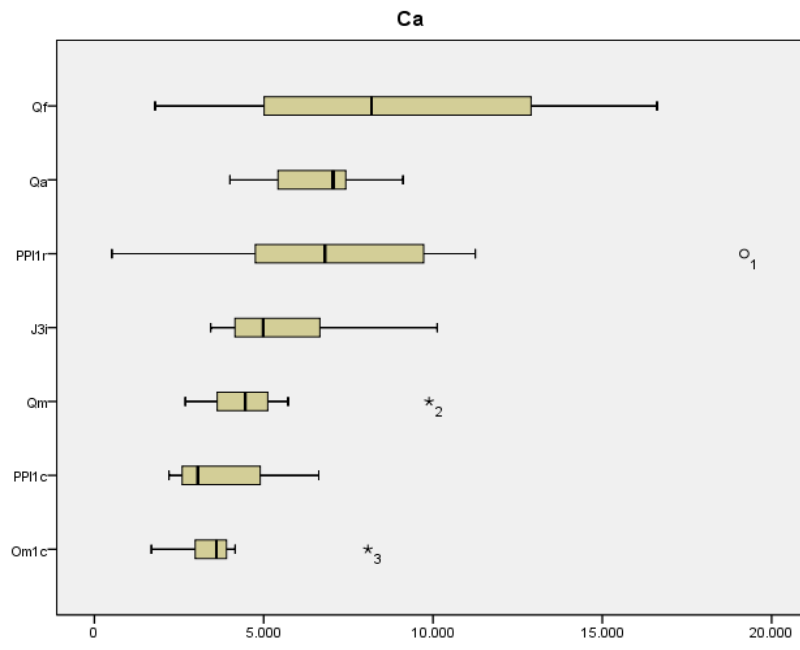


Figura 47: Box Plot Geología de Arica para Calcio.

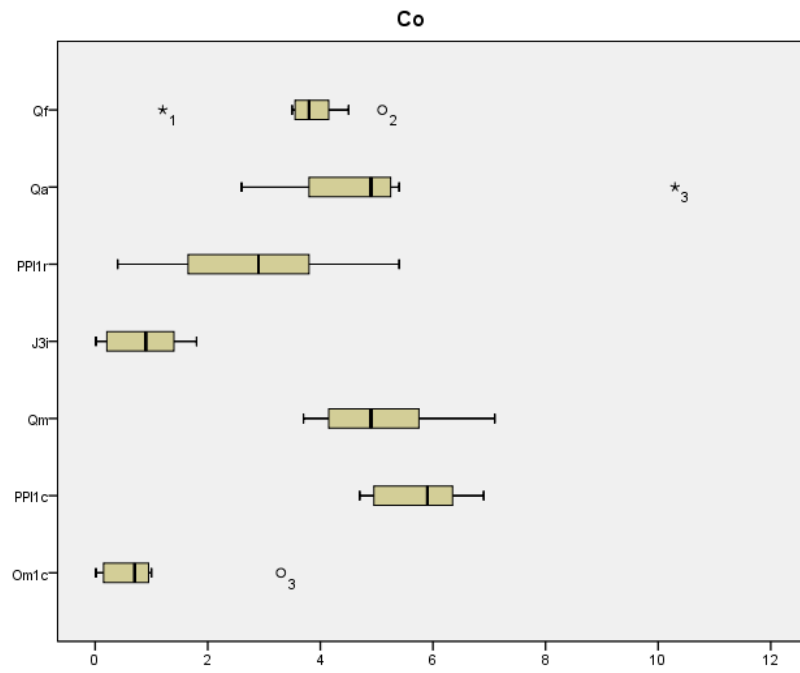


Figura 48: Box Plot Geología de Arica para Cobalto.

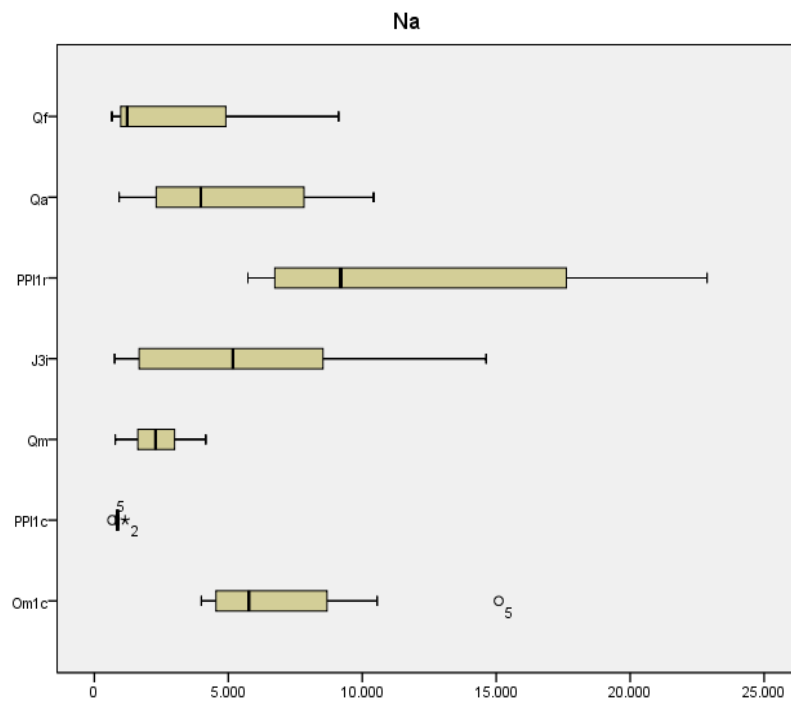


Figura 49: Box Plot Geología de Arica para Sodio.

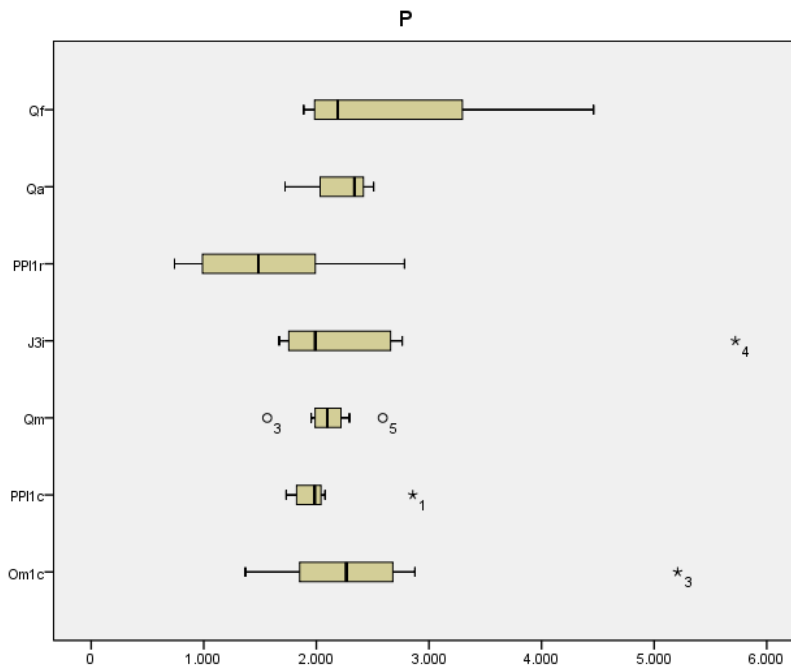


Figura 50: Box Plot Geología de Arica para Fosforo.

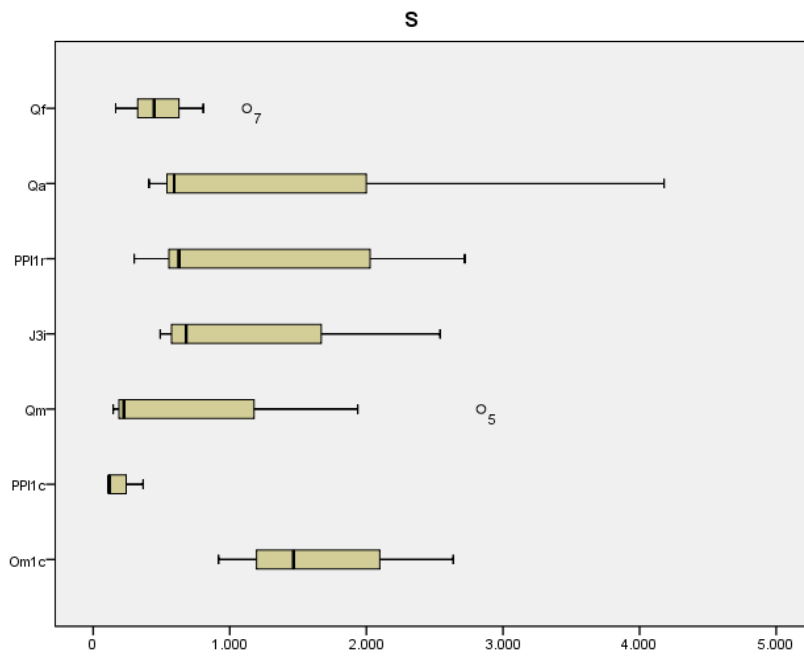


Figura 51: Box Plot Geología de Arica para Azufre.

Anexo V
Correlación de Spearman para la geología de la ciudad de Arica

En este anexo se muestran las correlaciones de Spearman para la Geología de la ciudad de Arica respecto a los elementos en estudio, destacando aquellos valores sobre el valor 0.5.

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,24**	1					
Ca	-0,04	0,12	1				
Co	0,25**	0,05	0,58**	1			
Na	-0,01	0,29**	0,24**	-0,04	1		
P	-0,13*	0,42**	0,17**	-0,11	0,29**	1	
S	0,12	0,44**	0,06	-0,15*	0,37**	0,44**	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 33: Correlación de Spearman de la Geología Qf (número de muestras 236).

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,33	1					
Ca	0.60	0,64	1				
Co	0.80*	0.15	0,49	1			
Na	0.43	0,17	0,74*	0,37	1		
P	-0.05	0,48	0,38	-0,30	-0.05	1	
S	0.76*	0,45	0,93**	0.54	0,74*	0,31	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 34: Correlación de Spearman de la Geología Qm (número de muestras 7).

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,13	1					
Ca	0,13	0,07	1				
Co	0,08	-0,18	0,21	1			
Na	-0,02	0,31*	0,17	-0,54**	1		
P	-0,39**	0,26*	-0,26*	-0,14	0,09	1	
S	-0,14	0,43**	0,23	-0,53**	0,68**	0,32**	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 35: Correlación de Spearman de la Geología Qa(número de muestras 66).

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,21	1					
Ca	0,62*	-0,04	1				
Co	0,53	0,19	0,88	1			
Na	0,16	-0,08	-0,09	-0,07	1		
P	0,29	0,18	0,52	0,57	0,27	1	
S	-0,32	0,27	0,08	0,26	0,13	0,62	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 36: Correlación de Spearman de la Geología PPI1r (número de muestras 12).

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,40*	1					
Ca	-0,36	-0,02	1				
Co	0,16	0,66**	0,04	1			
Na	0,29	0,25	0,25	0,05	1		
P	-0,15	0,21	0,37	0,12	0,10	1	
S	0,34	0,24	0,20	0,17	0,68**	0,36	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 37: Correlación de Spearman de la Geología J3i (número de muestras 24).

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,10	1					
Ca	-0,62**	-0,09	1				
Co	-0,01	-0,19	0,33	1			
Na	-0,13	0,18	0,08	-0,02	1		
P	-0,33	0,19	0,29	0,17	0,15	1	
S	-0,29	0,45*	0,34	-0,09	0,58**	0,38	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 38: Correlación de Spearman de la Geología Om1c (número de muestras 25).

	As	B	Ca	Co	Na	P	S
As	1						
B	0,28	1					
Ca	0,40*	-0,02	1				
Co	-0,22	-0,29	0,31	1			
Na	0,51**	0,73**	-0,09	-0,46*	1		
P	0,01	0,54**	-0,06	-0,48*	0,38	1	
S	0,54**	0,77**	0,02	-0,68**	0,82**	0,65**	1

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 39: Correlación de Spearman de la Geología PPI1c (número de muestras 26).

Anexo VI
Manejo del Software ArcGIS 10.2.1

Primero debemos ejecutar el Programa "ArcMap 10.2.1" como se muestra en la figura 52:

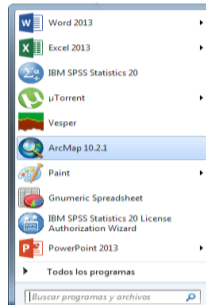


Figura 52: Programa ArcMap 10.2.1

Al ejecutar este icono se desplegará la ventana principal de ArcGIS como se muestra en la fig. 53:

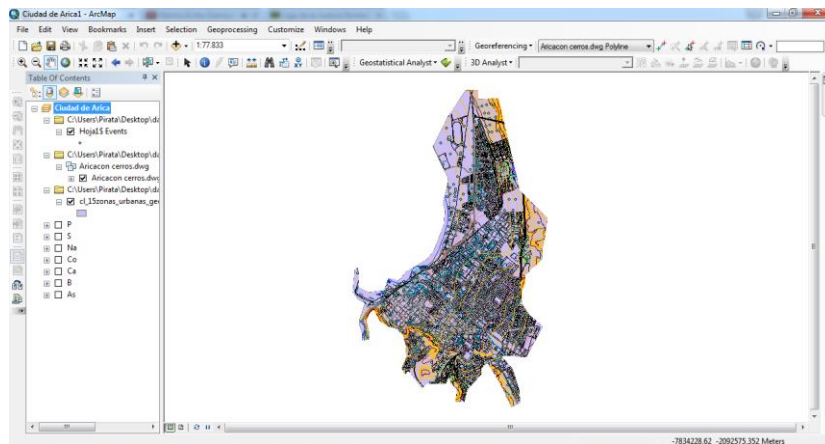


Figura 53: Ventana Principal del Programa ArcGIS 10.2.1

Una vez dentro del programa debemos seleccionar nuestra base con los puntos para que podamos juntarlo con el mapa de la ciudad de Arica para ello debemos ir a "File" luego a "Add Data" y posteriormente a "Add XY Data" como se muestra en la figura 54:

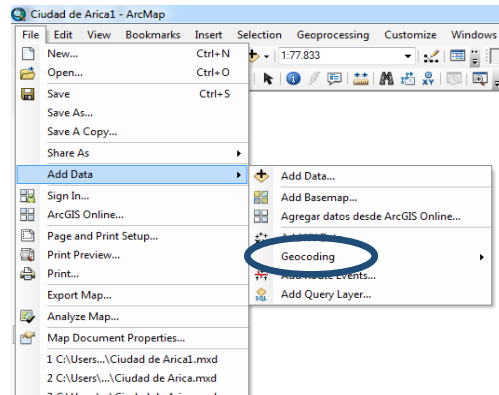


Figura 54: Menu desplegable de ArcGis para incertar coordenadas.

Seleccionada esta opcion nos aparecera un recuadro (figura 55) donde debemos seleccionar nuestro archivo en formato .XLS (excel) el cual debe contar con las coordenadas de cada punto muestreado Este y Norte para nuestro caso (figura 56) y luego completar los campos "X field" e "Y field" con las coordenadas Este y Norte correspondientemente. Por ultimo debemos seleccionar nuestro sistema de coordenada el cual se encuentra en la parte de "edit" buscandolo como "WGS_1984" para nuestro caso.

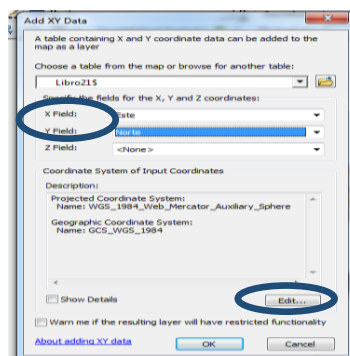


Figura 55: Menu de opcion para las coordenadas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1	7961897	363329	-0.4757	-0.3391	0.6141	15.206	-14.104	0.5111	-0.817
2	2	7962096	363293	-0.0188	0.3996	0.5545	0.4827	10.501	-0.2799	18.575
3	3	7961746	363530	-0.5841	-0.6681	0.1259	0.7364	0.0063	0.2023	-0.2538
4	4	7961408	363283	-0.5418	0.1227	-12.439	-0.5656	-0.5915	0.716	0.2344
5	5	7961526	363610	0.716	-0.2055	0.1576	29.546	-0.1513	-0.4898	-0.504
6	6	7961746	363530	-0.2312	-0.4373	0.1703	12.508	0.0948	0.54	0.1767
7	7	7961290	363691	-0.791	-10.447	0.4827	11.297	-0.6217	0.3726	-0.2344
8	8	7961628	363249	-0.088	-0.2344	0.3929	0.9971	-15.834	0.7825	-0.9666
9	9	7962070	362496	0.8392	-0.2538	0.0943	11.297	-11.538	-0.1069	-11.062
10	10	7961764	363000	-0.6063	-13.834	-0.9273	17.912	-14.818	0.0251	-19.755
11	11	7961964	363594	-13.003	-29.546	0.9081	-0.0031	0.8526	0.1259	14.633
12	12	7961772	363669	-0.3625	-0.6447	-0.228	0.3425	0.5255	0.4065	-0.2603
13	13	7961808	363774	-0.6681	-0.8617	-0.2023	0.2995	0.3391	0.3094	-0.3259
14	14	7961803	363834	-0.2766	-0.2441	-0.0188	0.1767	12.458	-0.1133	0.5766
15	15	7962016	363777	-0.4201	-0.0943	0.427	0.3996	17.045	-0.0817	13.772
16	16	7962041	363948	-0.3358	-11.297	-0.4898	0.3996	-0.2799	0.3094	-0.9767
17	17	7961700	364085	-0.1767	-0.774	0	0.8663	0.164	0.2799	0.0063
18	18	7962157	363731	0.2766	0.0126	0.0754	0.3996	0.676	0.6661	0.6217
19	19	7961476	364192	-0.1959	-0.2183	0.1322	0.4827	0.7241	0.1386	0.0502
20	20	7961895	364009	-0.2151	-0.3094	0.0063	0.1959	0.2538	0.0314	0.6066
21	21									

Figura 56: libro de Excel con base de datos de las coordenadas y los elementos de estudio.

Al ejecutar estos pasos volveremos a la ventana principal con los puntos muestreados en la pantalla (figura 57) luego debemos seleccionar nuestro mapa donde irán estos puntos por lo cual debemos volver a "file" luego en "add data" y luego en "Add data" (ver figura 58) donde buscaremos en nuestros archivos el mapa que queremos poner para nuestras muestras (mapa de Arica para este caso), donde luego tendremos nuestro mapa con los puntos muestreados como se muestra en la figura 59:

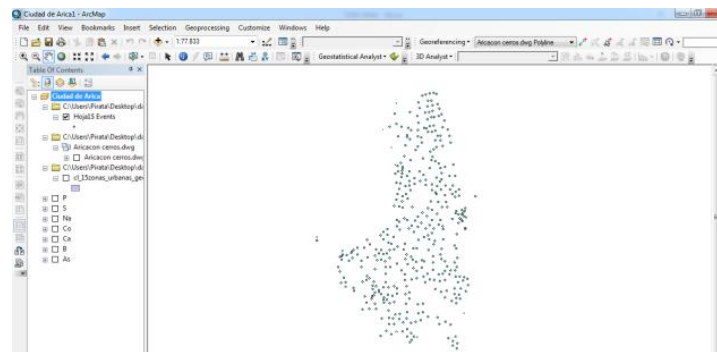


Figura 57: Ventana Principal de ArcGIS con los puntos incorporados.

Con el esquema completo (mapa de arica y puntos incorporados) podemos ir al siguiente paso que es la generacion de Krigings simples ,pero primero debemos generar los "trend analysis" para cada elemento por lo cual debemos ir a la opcion "Geostatistical analysis" , luego a "Explorer Data" y por ultimo "trend analysis"(ver figura 60).

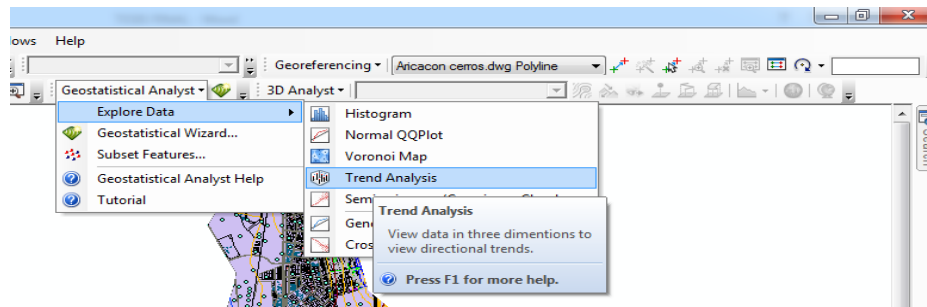


Figura 60: Menu desplegable de "Geostatistical analysis".

Al ejecutar esta opción se abrirá una ventana (figura 61) donde debemos desmarcar las casillas "Project data", "sticks" y "input data points", luego debemos seleccionar el elemento que deseamos estudiar en la opción "Attribute". Estos trend analysis nos servirán más tarde para poder realizar los Kriging simples a los elementos.

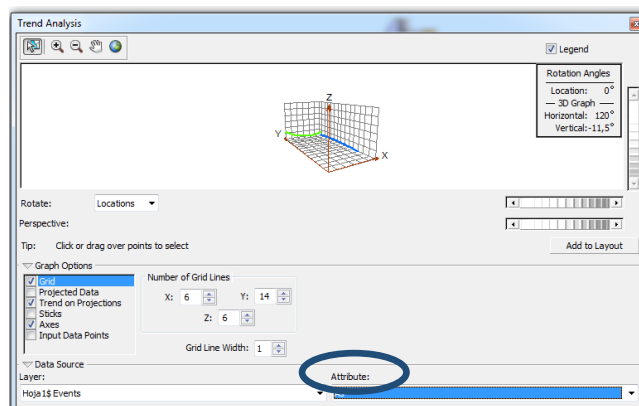


Figura 61: Ejemplo de un "TrendAnalysis".

Ya creado los "TrendAnalysis" para los elementos en estudio debemos pasar a la elaboración de los Kriging simples para ello debemos volver a la opción "Geostatistical analysis" y elegir la opción " Geostatistical Wizard"(ver figura 62).

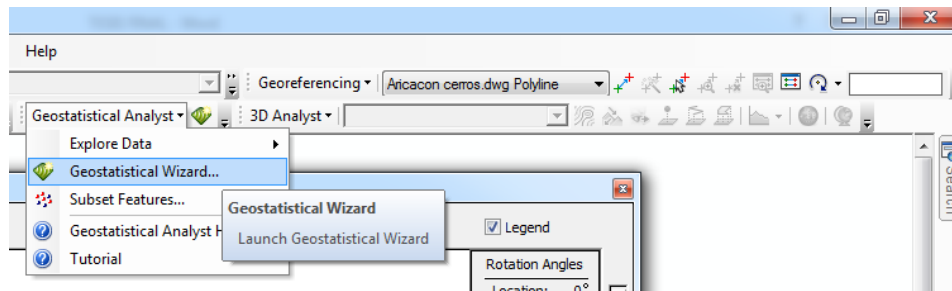


Figura 62: menú desplegable de "GeostatisticalAnalysis" para creación de Krigings.

Esto nos abrirá una ventana donde debemos seleccionar la opción de "kriging/Cokriging" donde luego seleccionamos nuestro elemento en estudio en la opción "Data Field" como se muestra en la figura 63.

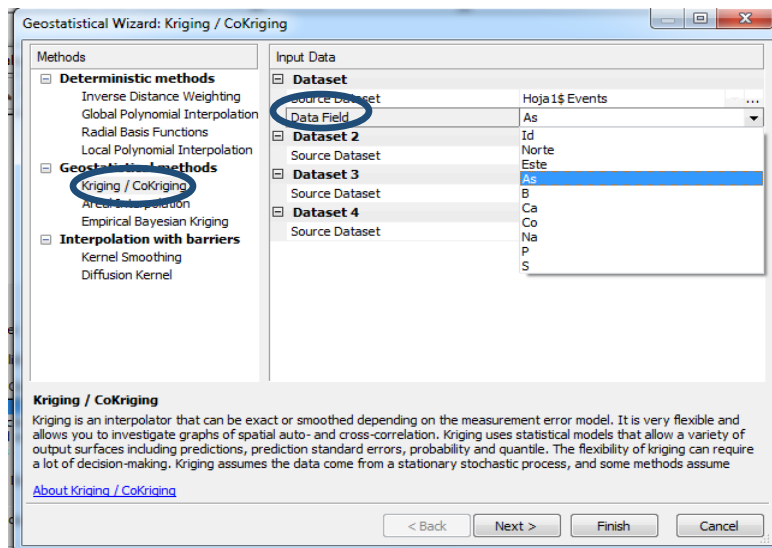


Figura 63: Paso 1 de 7 para la creación de Krigings en los elementos.

Realizado esto vamos a la siguiente ventana apretando la opción "Next" la que nos llevara a la siguiente ventana (ver figura 64) . Aquí debemos seleccionar el tipo de Kriging , simple para este caso y en la opción "Output Surface Type" la opción "Prediction" , por ultimo en la opción "Order of trend removal" debemos seleccionar el tipo de Trend que realizamos anteriormente (ver figura 61) , estos van a depender del elemento pueden ser de constante de 1º,2º o 3º orden. Luego hacer clic en "Next".

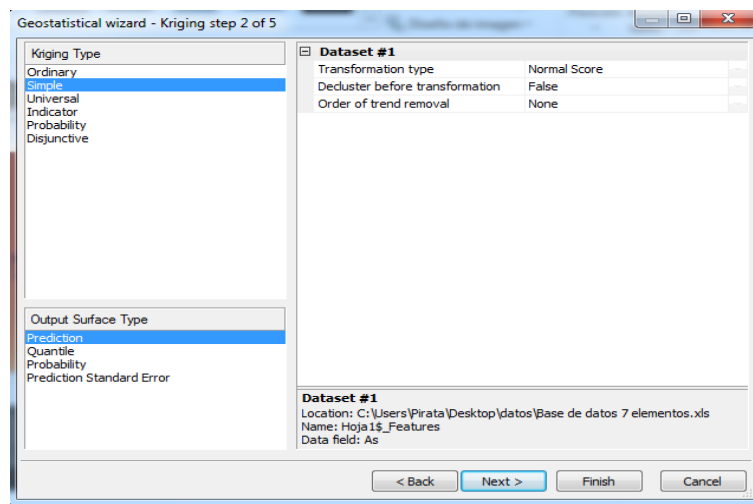


Figura 64: Paso 2 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

En la siguiente ventana debemos ver si existe presencia de anisotropía en el mapa (ver figura 65).luego hacer clic en "next".

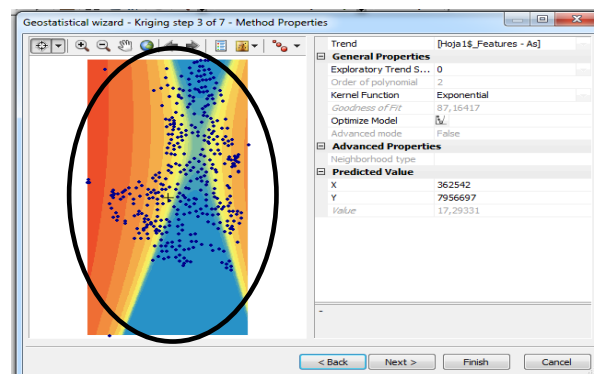


Figura 65: Paso 3 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

En esta ventana (fig.66) nos muestra cómo se distribuyen nuestros datos en relación a la curva normal. No debemos realizar ninguna acción en esta ventana por lo que vamos a la siguiente ventana.

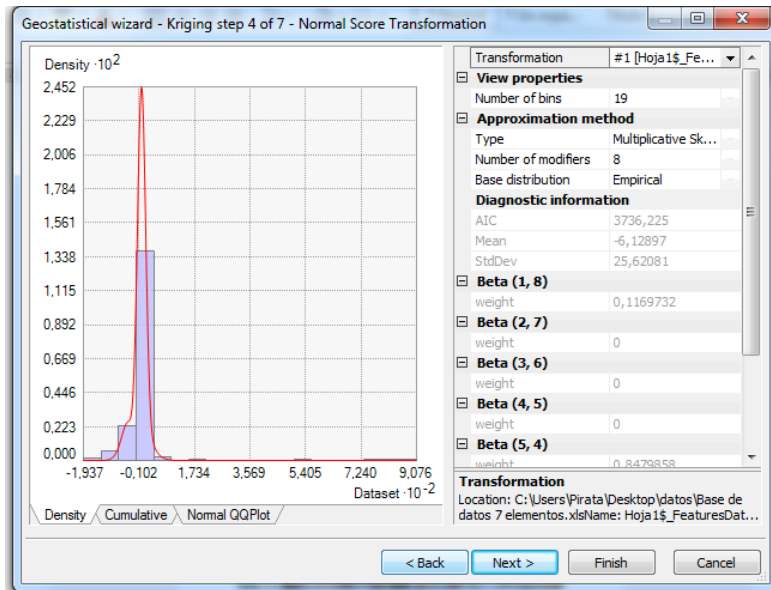


Figura 66: Paso 4 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

En esta ventana debemos seleccionar el tipo de método por el cual queremos realizar nuestro Kriging para nuestro caso es el Modelo Circular y seleccionar si existe o no anisotropía (ver figura 64), en caso de existir debemos seleccionar la opción "Show search direction" como "true" la cual nos dejara movilizar los ángulos, tolerancia de la elipse la cual debemos ajustar hasta que se adecue el ángulo y la tolerancia a la elipse como se muestra en la figura 67. Luego de esto pasamos a la siguiente ventana.

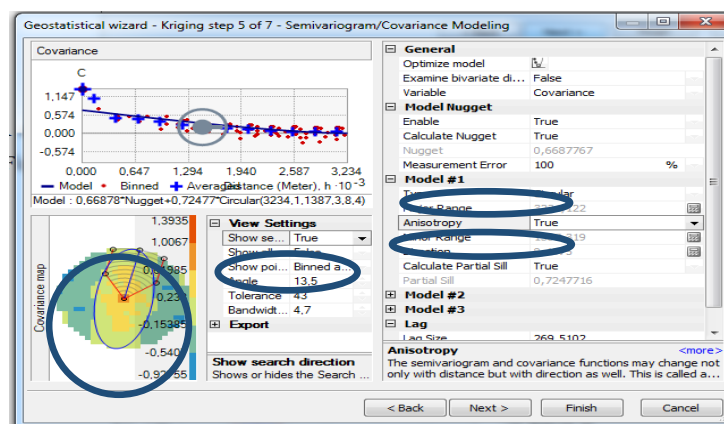


Figura 67: Paso 5 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

En esta ventana (figura 68) nos muestra un esquema de nuestro kriging según el modelo utilizado y las opciones seleccionadas. En esta parte no se realiza ninguna acción por lo cual pasamos a la siguiente ventana.

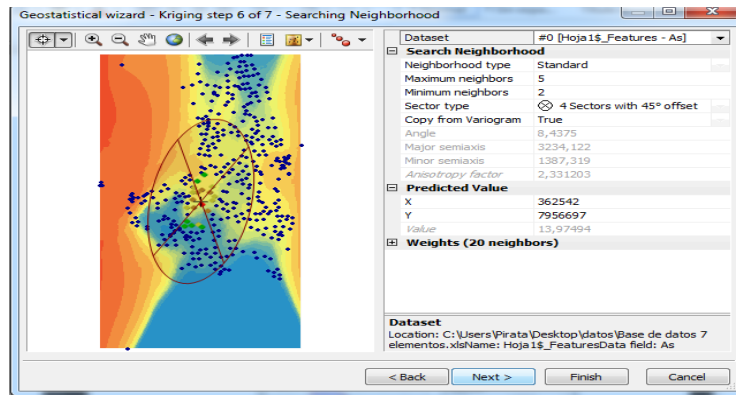


Figura 68: Paso 6 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

Como paso final aparecerá esta ventana (figura 69) con varios estadísticos como resultado del análisis. En esta parte tampoco se realiza ninguna acción por lo cual debemos seleccionar "finish" para que nos entreguen nuestro Kriging del elemento.

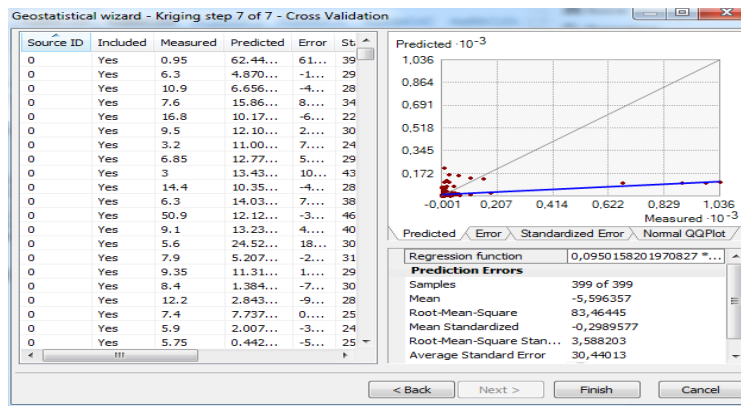


Figura 69: Paso 7 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

Con los pasos anteriores finalizados aparecerá una ventana resumiendo el método utilizado (ver figura 70) este se puede guardar o simplemente seleccionar "OK" para que nos lleven hasta la visualización del Kriging en el mapa (ver figura 71).

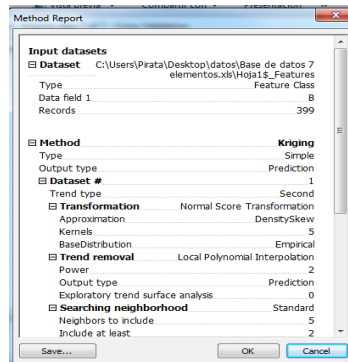


Figura 70: Reporte del Método utilizado.

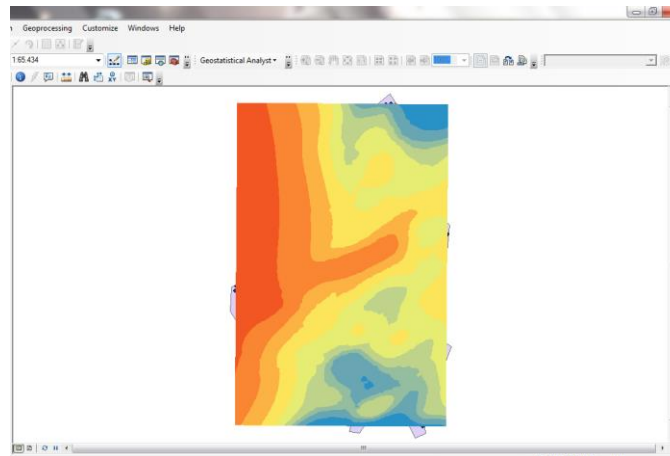


Figura 71: Resultado del Kriging.

Con el Kriging ya realizado debemos extender el mapa del Kriging realizado, con el del mapa original para ello debemos hacer clic en el mapa e ir a la opción "Properties" (ver fig.72). Nos abrirá una ventana en la cual debemos ir a la opción "set the Extent to" y luego elegir el mapa al cual deseamos que se acomode el Kriging (ver figura 73).

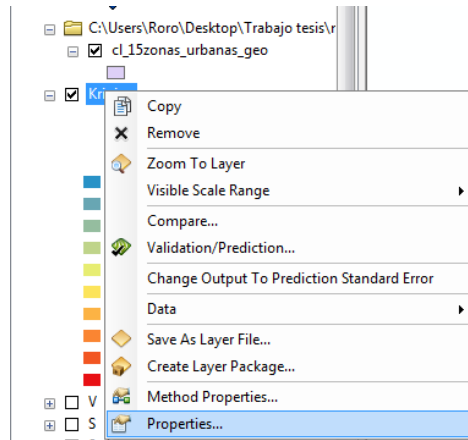


Figura 72: ajuste del Kriging al mapa.

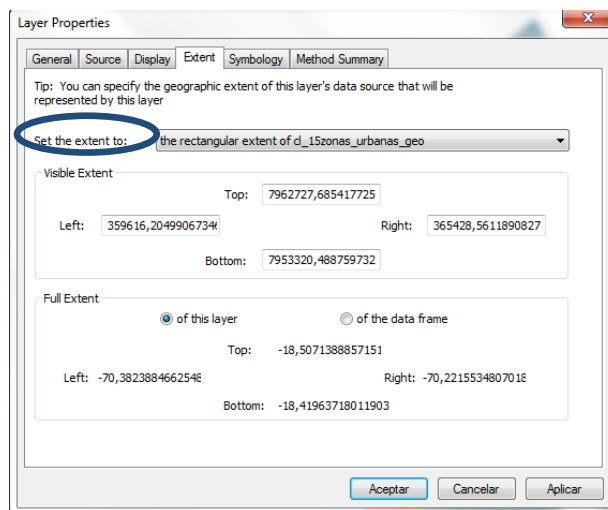


Figura 73: selección del mapa para el ajuste del Kriging.

Ya realizado esto el mapa del kriging se extenderá en el mapa que utilizamos de un inicio (ver figura 74), el paso siguiente es que el mapa de Kriging adopte la forma del mapa de la ciudad de Arica, para ello debemos ir a la opción "propiedades" de layers como se muestra en la figura 75. Aquí se abrirá una ventana con opciones (ver figura 76) en la cual debemos seleccionar la casilla "Clip to Shape" y luego en la opción "specifyShape".

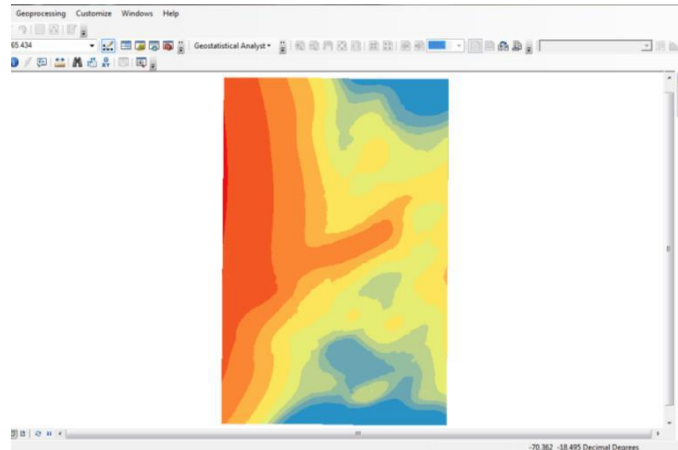


Figura 74: Kriging expandido en todo el Mapa de Arica.

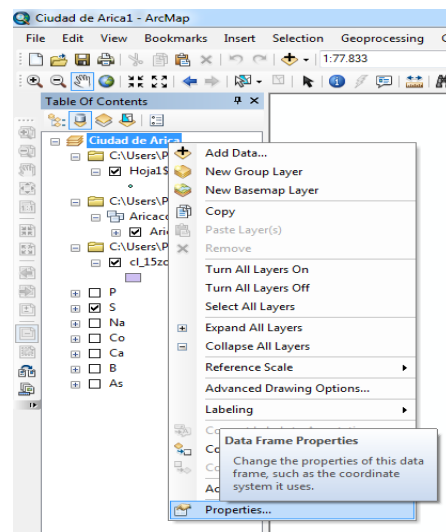


Figura 75: Menú desplegable para los Layers.

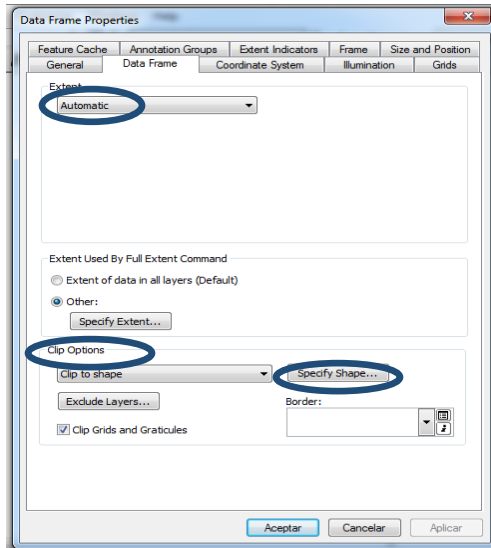


Figura 76: Menú de Data Frames.

Al ejecutar "specify Shape" nos aparecerá una ventana (ver figura 77) la cual nos dejara elegir que mapa o "shape" quedemos que se ajuste nuestro kriging para ello seleccionamos el mapa original con el cual estamos trabajando y damos clic en "Ok".

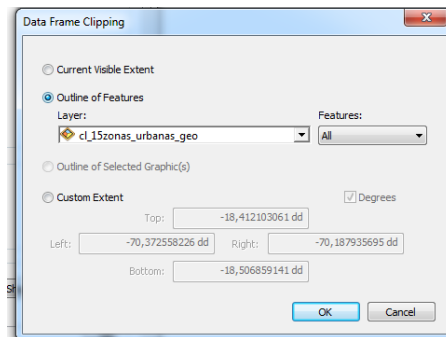


Figura 77: Selección de Mapa para el ajuste del Kriging.

Ya realizadas estas acciones tendremos nuestro mapa con el kriging ajustado como se aprecia en la figura 78. Finalmente si queremos una transparencia en nuestro Kriging para apreciar el mapa de trasfondo debemos seleccionar el Kriging que queremos realizar este efecto e ir a "properties" (ver figura 79) y luego a la pestaña de "display" (ver figura 80) y reducir el porcentaje de transparencia (se recomienda un 20% para que sea notorio el mapa de trasfondo).

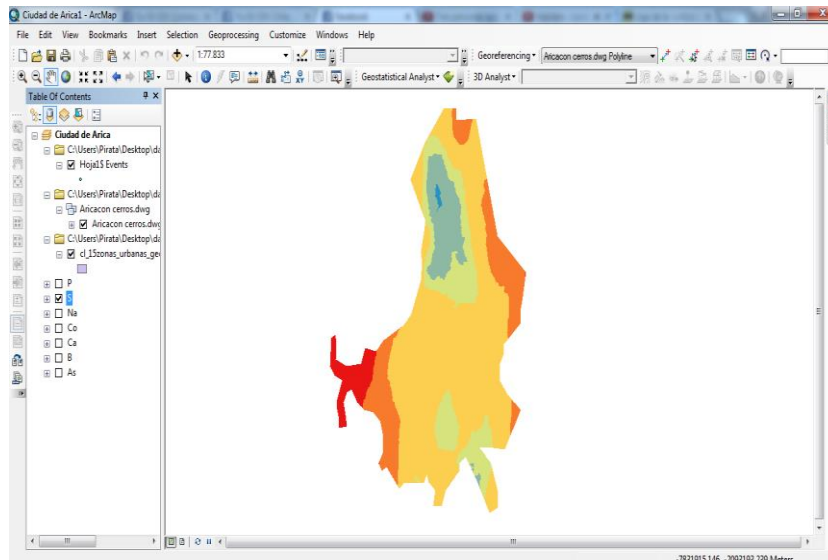


Figura 78: Kriging ajustado al Mapa original.

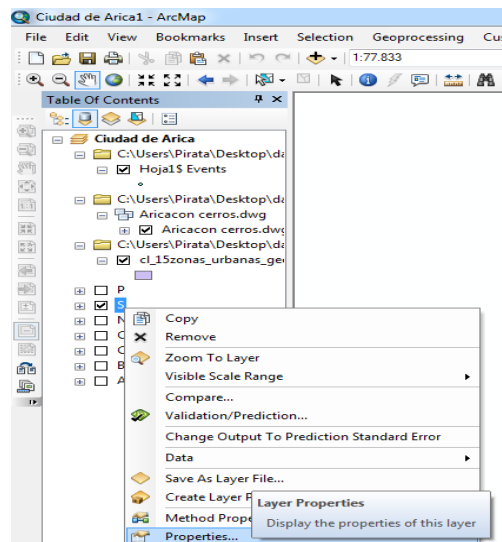


Figura 79: Opciones del Kriging.

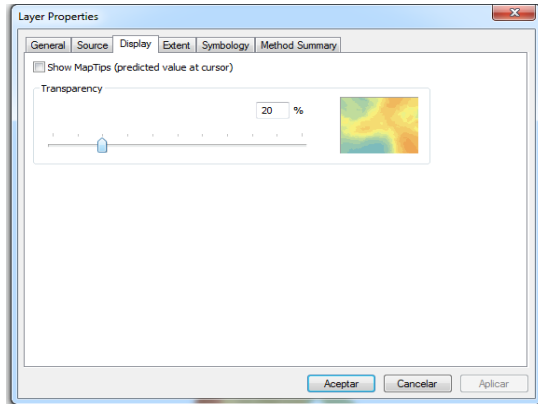


Figura 80: Transparencia de los mapas del Kriging.

Realizado los pasos anteriores obtendremos nuestro mapa con Kriging con el mapa original de trasfondo visible como se aprecia en la figura 81.

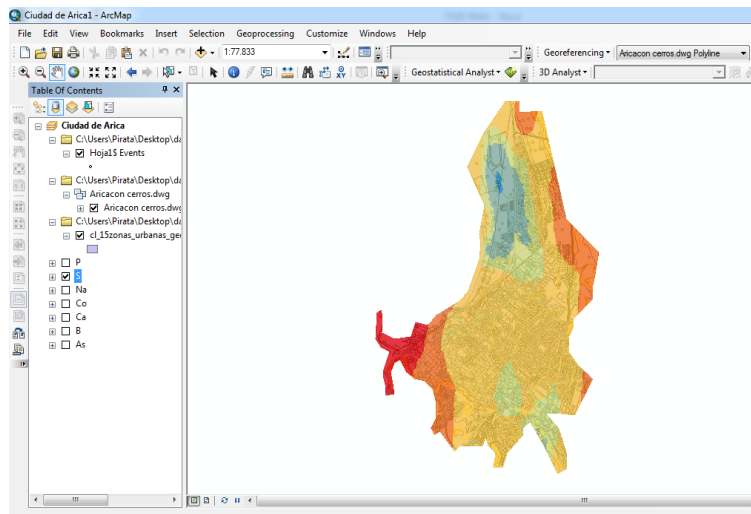


Figura 81: Mapa final con Kriging y mapa de trasfondo.

Anexo VII
Tutorial realizado en ArcGIS 10.2.1. Para selección de variogramas.

- Procedimiento

Al igual que en Anexo VI debemos dirigirnos a la siguiente pestaña (fig.82).

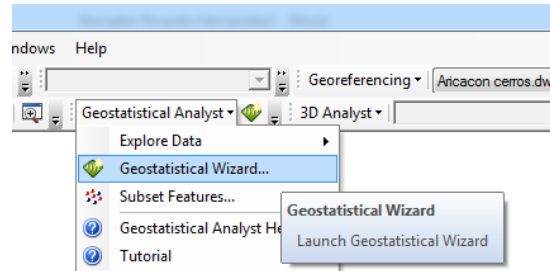


Figura 82: Menú desplegable de "Geostatistical Analysis" para creación de Krings.

Una vez dentro debemos seleccionar nuestro elemento a analizar e ir al botón de siguiente (fig. 83).

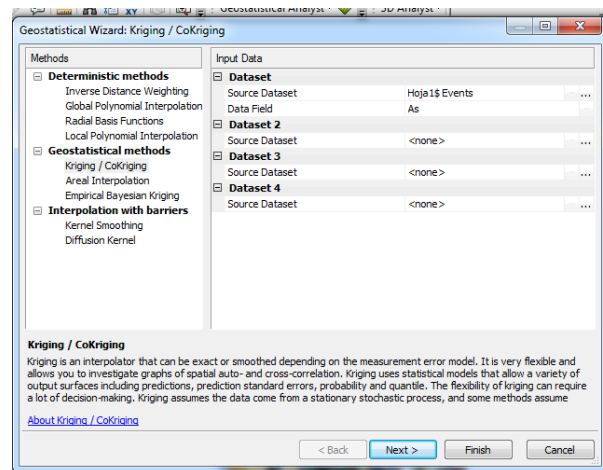


Figura 83: Paso 1 de 7 para creación de Krings en los elementos.

En esta parte debemos seleccionar el tipo "trend removal" y luego ir a siguiente (fig. 84).

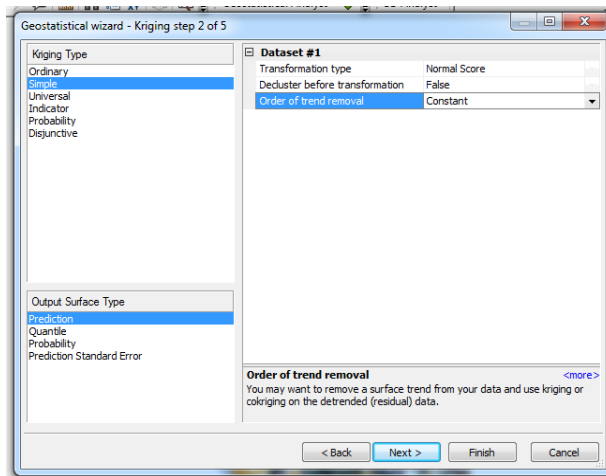


Figura 84: Paso 2 de 7 para creación de Krigings en los elementos.

Del paso anterior aparecerá esta ventana en la cual no debemos hacer nada e ir a la siguiente ventana con el botón siguiente (fig. 85).

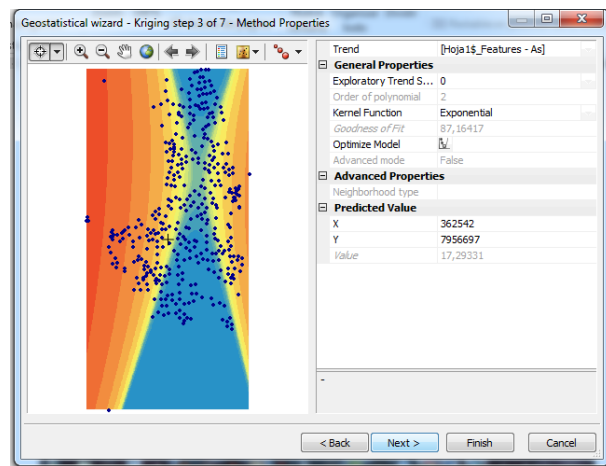


Figura 85: Pasó 3 de 7 para creación de Krigings en los elementos

Al igual que en la ventana anterior debemos solamente ir botón de siguiente (fig. 86).

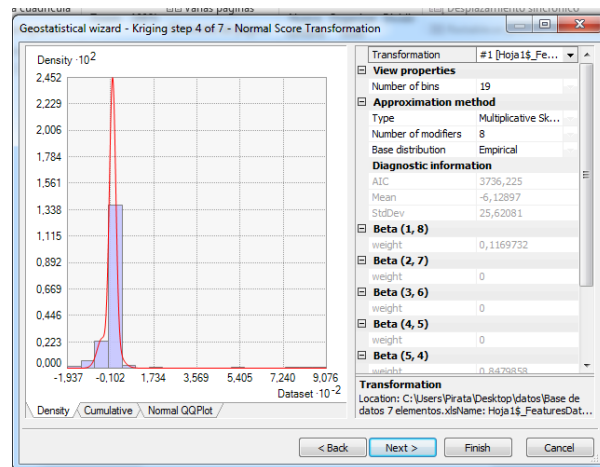


Figura 86: Paso 4 de 7 para creación de Krigings en los elementos

En esta ventana (fig. 87) debemos seleccionar un modelo para nuestros datos, además de indicar si hay presencia o no de anisotropía (el tutorial de este paso se encuentra en el anexo VI).

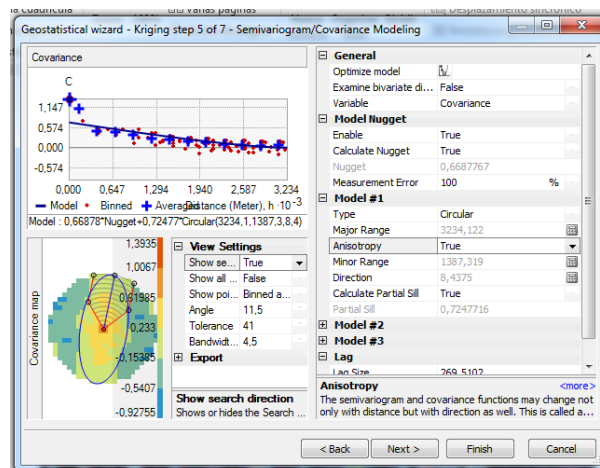


Figura 87: Paso 5 de 7 para creación de Krigings en los elementos

En esta ventana no debemos realizar ninguna acción por lo cual pasaremos a la próxima con el botón de siguiente (fig. 88).

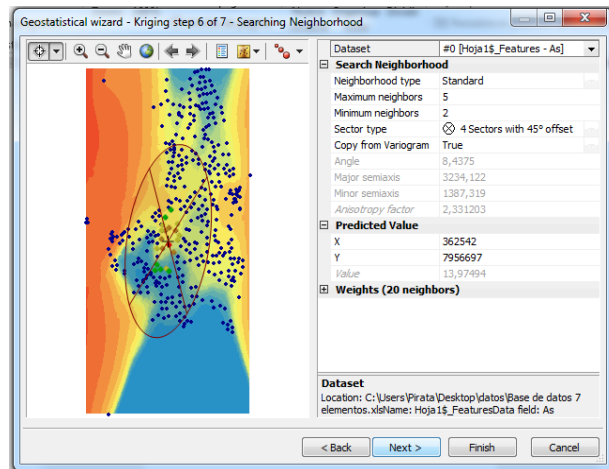


Figura 88: Pasó 6 de 7 para creación de Krigings en los elementos

En esta ventana (fig. 89) se registran los errores los cuales se pueden comparar entre los distintos modelos que podemos seleccionar en la ventana de la figura 85 y elegir aquel que posea un menor error (dando prioridad al tipo de error RMSE, según lo visto en la literatura).

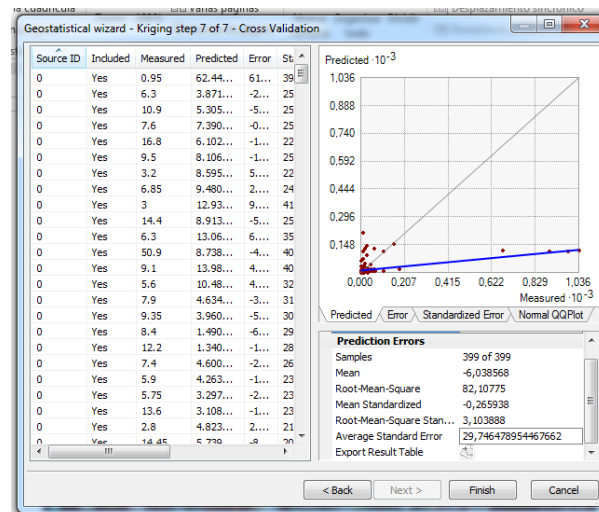


Figura 89: Pasó 7 de 7 para creación de Krigings en los elementos